Série : E
N° d'ordre :
3

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE DIPLÔME D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

BERNARD PERSOZ

1re THESE. — NOUVELLES MÉTHODES DE MESURE DE LA CHALEUR SPÉCIFIQUE VRAIE DES MÉTAUX A HAUTE TEMPÉRATURE.

Soutenue le 1940 devant la Commission d'examen.

MM. G. FOËX ..... *Président.*
L. NÉEL ..... } *Examinateurs.*
CH. SADRON ... }

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN
—
1940

Série : E
N° d'ordre :
3

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE DIPLÔME D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Bernard PERSOZ

1re THÈSE. — Nouvelles méthodes de mesure de la chaleur spécifique vraie des métaux a haute température.

Soutenue le **1940 devant la Commission d'examen.**

MM. G. FOËX ..... *Président.*
L. NÉEL ..... } *Examinateurs.*
Ch. SADRON ... }

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1940

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Doyen..... A. DANJON, Professeur d'astronomie.
Doyen honoraire.. E. BATAILLON.
Professeurs honoraires..... E. CHATTON, E. ESCLANGON, M. FRÉCHET, H. GAULT, M. GIGNOUX, L. HACKSPILL, E. DE MARGERIE, G. RIBAUD, E. TOPSENT, G. VALIRON, H. VILLAT, P. WEISS.

Professeurs.....

E. ROTHÉ.....	Physique du Globe.
H. OLLIVIER.....	Physique générale.
C. HOUARD	Botanique.
E. TERROINE.....	Physiologie générale.
J. DE LAPPARENT.	Minéralogie et Pétrographie.
G. CERF.....	Analyse supérieure.
G. DUBOIS.....	Géologie et Paléontologie.
P. FLAMANT.....	Calcul différentiel et intégral.
E. CORNEC.....	Chimie générale.
P. DE BEAUCHAMP.	Zoologie et Anatomie comparée.
L. BOUNOURE....	Biologie générale.
R. ROMANN	Chimie minérale et Chimie physique
G. FOEX	Physique expérimentale.
A. KIRRMANN	Chimie organique.
H. CARTAN.....	Mathématiques générales.
H. WEISS	Physico-chimie des hydrocarbures.
L. NÉEL.....	Physique générale.
G. HUGEL	Chimie du Pétrole.
N.	Mécanique rationnelle.
R. BONNET.....	Physique et Chimie biologiques.
A. CHRÉTIEN	Chimie minérale.
R. HOCART.....	Minéralogie.
J. MARESQUELLE.	Botanique.

Maîtres de conférences.....

CH. STAEHLING...	Chimie appliquée.
A. ROUSSEL.....	Mathématiques générales.
H. FORESTIER....	Chimie.
J. ROTHÉ	Physique du Globe.
CH. SADRON	Physique générale.
E. WOLFF.....	Biologie générale.
PH. L'HERITIER...	Zoologie.
J. YVON.....	Physique mathématique
L. CAGNIARD.....	Physique du Globe.
A. HEE.....	Botanique.
CH. EHRESMANN .	Mathématiques.

Secrétaire . ..... N.... .....

A MA FAMILLE ET A MES AMIS

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543521_0162

NOUVELLES MÉTHODES DE MESURE DE LA CHALEUR SPÉCIFIQUE VRAIE DES MÉTAUX A HAUTE TEMPÉRATURE

Par Bernard PERSOZ

INTRODUCTION

1. Contenu du mémoire. — Ce travail se compose de deux parties distinctes :

1° Description d'une méthode de mesure de chaleur spécifique vraie, mise au point récemment par M. Néel (1), et son application à deux alliages nickel-cuivre, pour des températures comprises entre 0° et 400° C.

2° Description et mise au point d'une nouvelle méthode de détermination de la chaleur spécifique vraie d'un fil, imaginée avec M. Néel (2), et application à la variation thermique de la chaleur spécifique du platine entre 100° et 1 000° C. et du nickel entre 400° et 1 000° C. (3).

Nous n'insisterons pas sur l'intérêt évident que présente la mesure *directe* des chaleurs spécifiques vraies, en particulier sur les corps tels que les ferromagnétiques, dont toutes les propriétés — ou leurs dérivées — présentent des discontinuités à leur point de Curie.

Les méthodes donnant directement cette grandeur semblent relativement nombreuses. Elles consistent toutes à fournir à l'échantillon étudié une quantité d'énergie connue et à mesurer l'élévation de température consécutive. On peut les classer en deux catégories :

A. Les méthodes qui emploient un échantillon massif ;

B. Les méthodes de fil.

La première méthode que nous allons décrire est une méthode A. La seconde est une méthode B. Au début de la première partie (§ 6) nous citerons quelques-unes des méthodes A parmi les plus connues, et, au début de la deuxième partie (§ 25), quelques méthodes B.

Voyons très brièvement quels sont les principaux avantages et inconvénients de ces deux types A et B.

2. Pureté de l'échantillon. — Les méthodes A ont l'avantage sur les secondes de pouvoir utiliser un échantillon de grande pureté, facteur indispensable lors de l'étude de la discontinuité du point de Curie. D'autre part, dans l'étude des alliages, les méthodes A s'imposent aussi, car il n'est pas toujours facile d'étirer en fil homogène de section constante un alliage de composition donnée, qui a été fondu au creuset.

3. Procédé de chauffage de l'échantillon. — Un fil peut être échauffé uniformément par le simple passage d'un courant électrique, tandis que l'échantillon massif doit être échauffé par un autre procédé, moins simple, tel que :

Enroulement chauffant extérieur (Moser (4)).

Enroulement chauffant intérieur (Nernst (5), Sykes et Jones (6), Gaede (7), première méthode décrite ici § 7).

Bombardement électronique (Klinkhardt (8)).

Courants de Foucault (Thomas et Davies (9)).

Dans tous ces cas l'échauffement de la masse métallique n'est pas uniforme et il faut attendre assez longtemps pour que l'uniformité de température se réalise, d'où augmentation des pertes de chaleur.

4. Mesure de l'élévation de température. — Cette mesure peut se faire par un couple thermoélectrique dont la sou-

dure est fixée sur l'échantillon. Pour les méthodes de fil ce procédé présente un inconvénient : les fils de couple sont soudés ou rivés dans le fil étudié (Lapp (10), Ahrens (11), Lecher (12)), et, malgré toutes les précautions prises, on n'est jamais sûr que les variations locales de résistance qui en résultent soient négligeables. Mais on peut aussi utiliser un thermomètre à résistance (Nernst (5)) qui, pour les méthodes B, sera constitué par le fil échantillon lui-même (Harper (13), Behrens et Drucker (14), Corbino (15 et 16), Néel et Persoz (2 et ici § 27)).

5. **Pertes de chaleur.** — La question des pertes de chaleur et des corrections qui en résultent est importante surtout à haute température où les pertes par rayonnement deviennent rapidement considérables. Les échantillons des méthodes A doivent avoir une forme ramassée, pour rendre aussi petit que possible le rapport de la surface extérieure à la masse. On diminue ainsi dans les mêmes proportions l'importance relative des pertes de chaleur, qui resteraient donc considérables dans les méthodes B de fil, si l'on n'y remédiait d'une autre manière.

Harper (13) a réduit les pertes de chaleur en enroulant le fil sur lui-même, ce qui diminue beaucoup la surface extérieure. Certains expérimentateurs ont essayé d'opérer adiabatiquement, en faisant varier la température extérieure comme celle de l'échantillon (Moser (4), Sykes et Jones (6)), ou ont choisi les températures initiale et finale telles qu'elles soient à peu près symétriques par rapport à la température du four (Thomas et Davies (9)) ; de cette façon la somme algébrique des pertes se trouve relativement petite. Il est préférable de diminuer le temps de chauffage, ou, plus exactement, le temps qui sépare le début du chauffage, de la mesure de l'élévation de température. La deuxième méthode proposée ici utilise un intervalle de 0,1 seconde. Pirani (17)

avec sa méthode d'enregistrement par oscillographe utilise un temps extrêmement petit, tout l'intervalle de température étant parcouru en quelques centièmes de seconde. La rapidité de l'expérience diminue quelquefois la précision à température ordinaire, mais permet alors d'explorer les très hautes températures avec cette même précision.

PREMIÈRE PARTIE

6. **Rappel des méthodes A les plus connues.** — Il existe un certain nombre de méthodes A pour mesurer la chaleur spécifique vraie d'un échantillon métallique massif. Nous ne pouvons toutes les passer en revue. Citons seulement les plus originales.

La plus ancienne paraît être celle de Gaede (7). L'énergie est apportée par un courant électrique circulant dans un fil de constantan et l'élévation de température mesurée par un thermomètre à résistance de cuivre. Nernst (5) emploie un

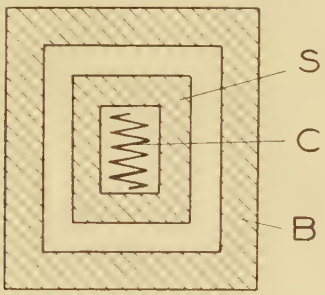

Fig. 1. — Principes de la méthode Sykes et Jones (6).

fil de platine simultanément comme enroulement chauffant et comme thermomètre à résistance. Il semble être le premier à employer le vide pour diminuer les pertes de chaleur. Sucksmith et Potter (18) chauffent leur échantillon avec une spirale de platine placée entre deux cylindres coaxiaux. Klinkhardt (8) chauffe une plaque de métal avec un faisceau

de rayons cathodiques. L'élévation de température est évaluée avec un thermocouple Pt, Pt-Rh. Les pertes d'énergie sont assez considérables car le chauffage est lent (30 à 60 sec.). Sykes et Jones (6) se servent d'une méthode rapide : l'échantillon S (fig. 1), qui est creux et qui contient un enroulement chauffant C, est lui-même placé dans un bloc de cuivre B dont il est isolé thermiquement. Le tout est placé dans un four électrique, de sorte que la température de B croît à peu près linéairement en fonction du temps. En agissant sur le courant qu'on envoie dans l'enroulement C, on s'arrange pour que la différence des températures de S et de B soit aussi petite que possible. Grâce à un couple qui a une soudure sur B et une soudure sur S, on peut noter les instants où cette différence de température est nulle et où, par suite, les échanges de chaleur entre S et B sont nuls. Il suffit donc de connaître pour chacun de ces instants la puissance mise en jeu dans l'enroulement C et la pente de la courbe de la température de S en fonction du temps, pour pouvoir en déduire la chaleur spécifique (1). Ainsi, en une seule expérience, on peut obtenir toute la variation thermique de la chaleur spécifique, entre la température ordinaire et une température assez élevée. Thomas et Davies (9) échauffent leur échantillon par les courants d'induction dus à un champ magnétique alternatif. Malheureusement la durée de chauffage est très grande (300 à 1 000 secondes). Les pertes de chaleur seraient énormes si les auteurs n'avaient pas pris la précaution de choisir leurs températures initiale et finale de part et d'autre de la température ambiante, de manière que la somme algébrique des échanges de chaleur soit ramenée à 2 o/o environ à 20° C.

L'originalité de la méthode que nous allons décrire consiste

(1) Il reste cependant une légère correction de rayonnement à effectuer sur cette pente.

en ce que les pertes de chaleur, au lieu d'être calculées à partir d'hypothèses plus ou moins justifiées, sont mesurées par un procédé direct.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

Le procédé décrit ici permet de mesurer la chaleur spécifique vraie des métaux ou alliages jusque vers 500° avec une précision de l'ordre de 5 o/oo.

7. Principe (2). — L'échantillon cylindrique A à étudier est placé dans le vide. Par l'intermédiaire d'un enroulement chauffant disposé à l'intérieur, on lui envoie une certaine

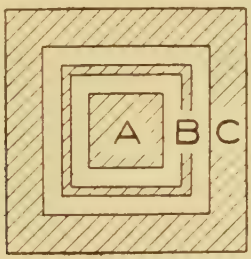

Fig. 2. — Principe du montage.

quantité de chaleur W que l'on mesure électriquement (3). L'élévation de température correspondante (environ 3°) se mesure soit par un couple thermoélectrique, soit par la résistance de l'enroulement chauffant lui-même. La chaleur perdue par l'échantillon est recueillie par une enceinte B, à l'intérieur de laquelle il est suspendu (fig. 2). L'échauffement

(2) Cette méthode a été imaginée et mise au point par M. Néel (1). Je n'y ai apporté qu'une modification de détail.

(3) Un appareil spécial, le joulemètre, a été construit à cet effet pour faciliter la mesure.

de cette enceinte B (environ o°15), mesuré par un thermocouple, donne la valeur à peu près exacte de cette chaleur perdue, car B est elle-même suspendue dans un thermostat en cuivre massif C auquel elle ne communique qu'une faible fraction de la chaleur qu'elle reçoit.

Pratiquement, si M et M′ sont les masses calorifiques de l'échantillon et de l'enceinte, θ et θ′ leurs augmentations de température, dont on trace les courbes en fonction du temps, la quantité $M\theta + M'\theta'$ représente à chaque instant la fraction de la chaleur W qui est encore présente dans

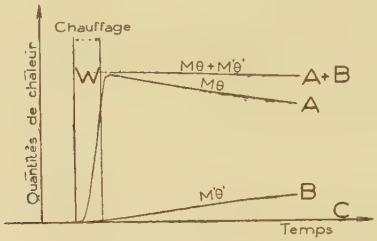

Fig. 3. — Principe du dépouillement.

l'échantillon et dans l'enceinte. Extrapolée vers l'instant milieu (4) du chauffage (fig. 3) elle est égale à l'énergie W elle-même, que l'on a mesurée, soit au potentiomètre et au chronomètre, soit au joulemètre. La quantité M étant l'inconnue du problème, on extrapole de préférence l'expression :

$$Z = \theta + \frac{M'}{M}\theta'$$

dans laquelle $\frac{M'}{M}\theta$ n'est qu'un terme correctif, et on l'égale à $\frac{W}{M}$, ce qui permet d'obtenir M par approximations successives.

(4) En toute rigueur ce choix du milieu de la période du chauffage n'est pas correct, mais l'erreur que l'on commet ainsi est négligeable.

Comme on le voit, le rôle de l'enceinte B est de donner les éléments nécessaires à la correction des pertes de chaleur de l'échantillon. Les variations de la fonction Z sont très faibles et l'extrapolation que l'on effectue est en somme équivalente à une correction du second ordre.

Dispositif expérimental

8. Echantillon A (fig. 4). — La masse métallique à étudier est taillée en forme de cylindre, la hauteur étant égale au diamètre (25 mm.) afin de rendre minima l'importance des échanges de chaleur avec l'enceinte. Le cylindre est scié en deux suivant un plan diamétral. Deux vis de nichrome permettent d'en assembler les deux moitiés.

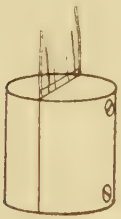

Fig. 4. — Echantillon A.

Fig. 5. — Enroulement chauffant.

L'enroulement chauffant, lorsqu'il doit servir aussi de thermomètre, ce qui est le cas des mesures que nous allons rapporter ici, est constitué par un fil de platine d'un dixième de millimètre de diamètre et d'une vingtaine de centimètres de long, disposé sur une feuille de mica (fig. 5). A ses extrémités sont brasés à l'argent deux fils de cuivre (diam. 0 mm. 3) servant à amener soit le courant de chauffage, soit le courant beaucoup plus faible destiné à la mesure de la résistance. A quelque distance des extrémités on a brasé sur le fil de platine deux fils de cuivre (diam.

o mm. 1) comme prises de tension pour la mesure de la résistance. Cet enroulement est entouré de deux autres feuilles minces de mica et placé entre les deux demi-cylindres.

Deux bandes de nichrome, pincées avec les feuilles de mica, non loin des deux génératrices limitant le plan de section, sont accrochées à la partie supérieure de l'enceinte et supportent l'échantillon.

9. Enceinte B. — Ce cylindre de cuivre creux porte à sa partie supérieure trois plaquettes du même métal, maintenues à l'aide de deux vis chacune (fig. 6). Sous l'une de ces

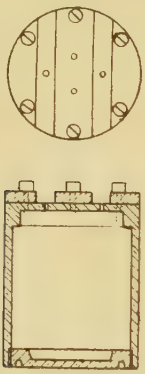

Fig. 6. — Enceinte B.

plaquettes est placée une lame de cuivre sur laquelle sont brasés les deux fils d'un couple BTE-CTE d'Imphy, destiné à mesurer la température Θ' de cette enceinte. Sous une autre plaquette est placée une lame de cuivre portant les extrémités des fils d'un couple étalon platine, platine rhodié.

Les quatre fils provenant de l'échantillon traversent la partie supérieure de l'enceinte dans de petits tubes de quartz. Afin de

supprimer les échanges directs de chaleur entre l'échantillon et le thermostat, il est nécessaire de serrer ensuite ces fils entre des feuilles de mica, sous les plaquettes, chacun sur une longueur de 2 ou 3 cm., de manière qu'ils prennent bien en ce point la température Θ'.

Au moment où l'on utilise le couple d'Imphy, il existe une certaine différence de température entre les corps B et C, c'est pourquoi il a paru utile d'allonger considérablement, en les enroulant en hélice, les portions des fils de couple comprises entre ces deux corps, afin que les soudures du couple soient effectivement à la température Θ' et non à une température intermédiaire entre celles des deux enceintes. Cette précaution est inutile pour le couple étalon, car, lorsqu'on se sert de celui-ci, les trois corps A, B et C sont à des températures très voisines, grâce à une atmosphère d'hydrogène qui remplit le four pour cette circonstance.

Les prises de tension reliées au joulemètre sont faites à mi-chemin entre l'enceinte B et le thermostat C.

10. **Thermostat C.** — Cette enceinte est à peu près l'homothétique de la première. Elle porte également à sa partie supérieure trois plaquettes destinées à serrer les dix fils provenant de la petite enceinte B, afin qu'ils ne transmettent pas de chaleur directement de l'intérieur à l'extérieur.

11. **Four.** — Ce four est constitué par un tube T de quartz vertical fermé à la partie inférieure et sur lequel on a enroulé une bande de nichrome (fig. 7). Les deux extrémités étant froides, on a disposé des écrans métalliques circulaires au-dessous et au-dessus du thermostat C afin de limiter la chaleur rayonnée dans ces directions. Les écrans supérieurs sont traversés par dix tubes de quartz, qui contiennent les dix fils dont nous avons parlé plus haut. Ces fils arrivent à une plaque de laiton D qu'ils traversent dans de petits tubes de quartz scellés à la piscéine. Un anneau E de laiton est fixé à la piscéine sur le tube T de quartz du four et vient s'appliquer contre la plaque D lorsque le four est fermé. Une circulation d'eau empêche cette partie de s'échauffer. Autour du tube T sont disposés trois tubes de

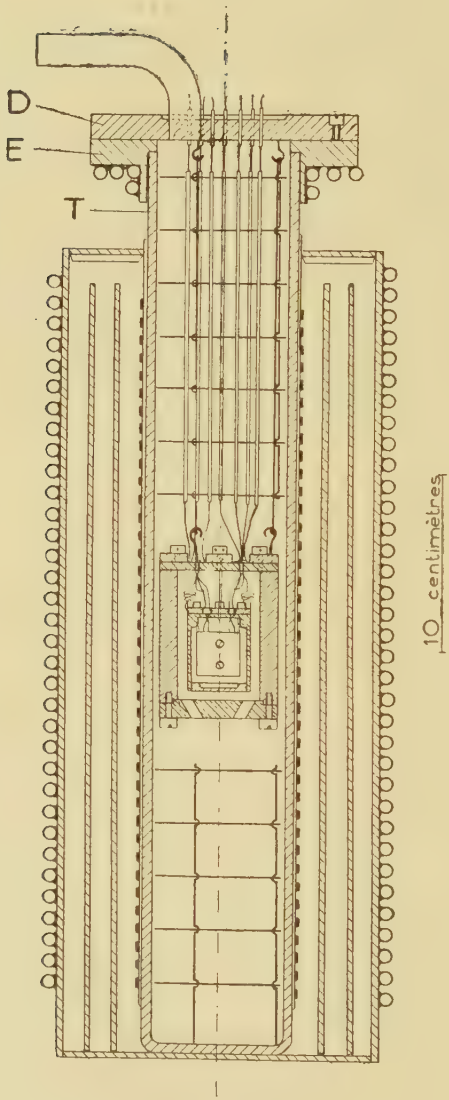

Fig. 7. — Four.

laiton coaxiaux jouant le rôle d'écrans. Celui qui est à l'extérieur porte une circulation d'eau. On ne pouvait songer à calorifuger davantage le four, sans quoi il aurait été beaucoup trop long à s'équilibrer.

Le vide qui est indispensable au moment de la mesure, pour réduire au minimum les échanges de chaleur, se fait dans le four par un tube de laiton aboutissant à la plaque D. L'installation comprend en série : un tube desséchant, une jauge de Pirani, un tube à décharges et une pompe à diffusion précédée de pompes préliminaires.

Etude particulière du joulemètre

12. Utilité. — Primitivement l'élévation de température de l'échantillon était mesurée avec un couple d'Imphy, mais ce procédé présente un inconvénient : lors de la mesure, les portions du couple qui entrent en jeu sont celles qui sont comprises entre l'échantillon et l'enceinte, là où s'établit le gradient de température. Ce couple est étalonné à chaque expérience en fonction du couple Pt, Pt-Rh, au moment où le four est équilibré. Comme nous l'avons dit, les trois corps A, B et C sont à la même température à ce moment et les portions qui entrent en jeu sont celles qui sont extérieures au thermostat. Etant donné la grande précision qu'exigent ces mesures, de petits défauts d'homogénéité des fils peuvent fausser les résultats, si l'on utilise une partie du couple qui n'a pas été étalonnée. Nous avons donc été conduits à utiliser un thermomètre à résistance de platine, et, pour éviter de compliquer trop le montage, à utiliser la même résistance pour échauffer l'échantillon.

Dans le montage primitif, l'enroulement chauffant était constitué par une bande de nichrome, dont la résistance varie peu avec la température. On pouvait alors sans inconvénients mesurer séparément et successivement l'intensité i,

Pour l'appareil que nous avons construit, nous avons choisi l'amortissement électromagnétique comme étant le plus sûr. Une spire fermée S de cuivre, solidaire du cadre V, se meut dans un entrefer cylindrique où règne le champ d'un aimant permanent. Dans ces conditions, la constance de l'amortissement peut être considérée comme suffisante. On place cet aimant assez loin de l'ensemble des bobines A et A′,

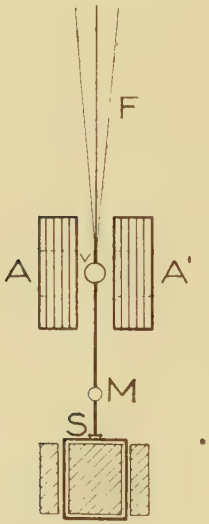

Fig. 8. — Joulemètre.

afin que son champ magnétique de fuite soit faible là où se trouve le cadre V et puisse être compensé, ainsi que la composante du champ terrestre le long de l'axe des bobines A et A′, par un petit aimant placé à distance convenable.

Les variations de température agissent sur la résistance de la spire S et par suite sur la constante d'étalonnage. On pourrait éviter cet inconvénient en constituant le circuit des volts avec le même cuivre que la spire S et en s'arrangeant pour

que le tout soit à la même température dans une enceinte close. L'amortissement a étant inversement proportionnel à la résistance de la spire S, on peut constater que le binôme de variation thermique de résistance se détruit dans l'expression de la sensibilité de l'appareil (équ. 2). Mais pratiquement cette condition n'est pas réalisable rigoureusement, et il faut tenir compte des variations de température.

Le poids de l'équipage mobile est assez considérable et impose une suspension métallique, donc avec torsion. Mais un fil très long F et de faible diamètre peut avoir une constante de torsion assez faible pour n'être pas gênante. Les fils d'amenée de courant sont fins et placés parallèlement au fil F, mais sans être tendus. Un miroir M permet de repérer les rotations du cadre par la méthode de Poggendorf.

L'appareil est étalonné en dissipant une puissance constante dans une résistance R_3 (fig. 9) en manganine. Grâce aux inverseurs I_5 et I_6 les deux circuits du joulemètre peuvent être mis en relation avec cette résistance. Un chronographe enregistreur permet de mesurer à 0 sec. 005 près le temps de passage du courant. On mesure successivement au potentiomètre P_3 la tension u et l'intensité i qui entrent en jeu dans l'étalonnage. En tenant compte de la variation thermique de la sensibilité, les différents étalonnages qui ont été effectués, s'accordent entre eux avec une précision supérieure au demi-millième.

15. Erreurs dues à l'appareil et corrections à effectuer. — Nous avons examiné les causes d'erreurs suivantes :

1° Torsion non nulle du fil F;

2° Variation de $\frac{\partial \mathfrak{I}}{\partial \alpha}$;

3° Ferro- et paramagnétisme inévitables du cadre mobile;

4° Mauvaise compensation des champs parasites;

5° Self-induction du circuit des volts;

6° Courants induits dans le cadre des volts;

7° Courant j de dérivation dans le circuit des volts, dans le cas où la résistance ρ de celui-ci n'est pas assez grande.

Nous avons fait les constatations suivantes :

1° Comme la torsion du fil F n'est pas nulle, le cadre revient lentement à sa position d'équilibre, avec une vitesse proportionnelle à l'angle qui l'en sépare (5). Connaissant la manière dont la puissance intégrée varie au cours du temps, on a tous les éléments pour calculer la correction nécessaire. En particulier, lorsque cette puissance est grossièrement constante — c'était le cas de nos mesures —, on peut annuler la partie principale de cette erreur en choisissant les positions initiale et finale du cadre symétriquement par rapport au zéro de l'appareil ;

2° Il est inutile de tenir compte de l'erreur 2 pour avoir une précision du millième ;

3° On peut éliminer l'erreur 3 en même temps que l'erreur 1 en choisissant comme zéro de l'appareil la position d'équilibre du cadre des volts, celui-ci étant ouvert, et celui des ampères parcouru par un courant égal à celui qui servira pour la mesure. De toute façon, il faut réduire au minimum cette erreur 3. en écartant systématiquement, dans la construction de l'équipage mobile, toutes substances ferromagnétiques telles que certains laitons ou certaines ébonites ;

4° Il est très facile de réaliser une bonne compensation et de la contrôler en faisant passer dans le circuit des volts une intensité 10 ou 100 fois plus forte que l'intensité normale ;

5° L'erreur 5 est négligeable pour un appareil tel que le nôtre, même en courant alternatif, sauf lorsqu'on travaille en haute fréquence ou lorsque la portion de circuit étudiée consomme presque uniquement de la puissance réactive ;

(5) Pour notre appareil, le spot, étant à 100 mm. du zéro, y revenait avec une vitesse de 2 mm. 5 par minute.

6° L'appareil peut aisément être calculé de manière que l'erreur 6 soit insignifiante ;

7° La cause 7 d'erreur est loin d'être particulière au joulemètre, mais la correction correspondante (2 à 3 o/oo pour les mesures que nous avons effectuées) est très facilement calculable. On pourrait d'ailleurs construire un joulemètre compensé qui ne présente pas ce défaut. Il suffirait de placer parallèlement aux bobines « ampères » deux autres bobines en série avec le circuit des volts, et présentant avec le cadre mobile la même induction mutuelle que les bobines des ampères.

16. Conclusion. — La plupart des erreurs systématiques possibles sont négligeables ou s'éliminent à condition de prendre certaines précautions. Le joulemètre est un appareil commode, de construction facile et permettant de mesurer rapidement et mieux qu'au millième près toutes sortes d'énergies électriques, même dans les cas où la tension et l'intensité varient rapidement (énergie dissipée dans une étincelle, dans la fusion d'un fil de plomb...). On peut même étendre le champ des mesures à d'autres grandeurs que l'énergie. Par exemple, la mesure de l'aire d'un cycle d'hystérésis peut se faire en plaçant l'échantillon ferromagnétique dans un transformateur sans fer, dont le primaire est en série avec le circuit « intensité » du joulemètre. Le secondaire est relié directement au cadre des volts. On peut constater facilement que, dans ces conditions, l'indication du joulemètre est proportionnelle à l'aire cherchée $\int H dB$.

17. Caractéristiques. — A titre d'indication, voici les ordres de grandeur des principales constantes de l'appareil que nous avons construit.

Induction mutuelle des deux circuits. — $0{,}94.10^{-4}$ henry.

Bobines des ampères. — Chacune a 140 spires de fil de 2 mm. Rayon extérieur : 5 cm. 6. Distance des centres des bobines : 5 cm. 8.

7° Courant j de dérivation dans le circuit des volts, dans le cas où la résistance ρ de celui-ci n'est pas assez grande.

Nous avons fait les constatations suivantes :

1° Comme la torsion du fil F n'est pas nulle, le cadre revient lentement à sa position d'équilibre, avec une vitesse proportionnelle à l'angle qui l'en sépare (5). Connaissant la manière dont la puissance intégrée varie au cours du temps, on a tous les éléments pour calculer la correction nécessaire. En particulier, lorsque cette puissance est grossièrement constante — c'était le cas de nos mesures —, on peut annuler la partie principale de cette erreur en choisissant les positions initiale et finale du cadre symétriquement par rapport au zéro de l'appareil ;

2° Il est inutile de tenir compte de l'erreur 2 pour avoir une précision du millième ;

3° On peut éliminer l'erreur 3 en même temps que l'erreur 1 en choisissant comme zéro de l'appareil la position d'équilibre du cadre des volts, celui-ci étant ouvert, et celui des ampères parcouru par un courant égal à celui qui servira pour la mesure. De toute façon, il faut réduire au minimum cette erreur 3, en écartant systématiquement, dans la construction de l'équipage mobile, toutes substances ferromagnétiques telles que certains laitons ou certaines ébonites ;

4° Il est très facile de réaliser une bonne compensation et de la contrôler en faisant passer dans le circuit des volts une intensité 10 ou 100 fois plus forte que l'intensité normale ;

5° L'erreur 5 est négligeable pour un appareil tel que le nôtre, même en courant alternatif, sauf lorsqu'on travaille en haute fréquence ou lorsque la portion de circuit étudiée consomme presque uniquement de la puissance réactive ;

(5) Pour notre appareil, le spot, étant à 100 mm. du zéro, y revenait avec une vitesse de 2 mm. 5 par minute.

6° L'appareil peut aisément être calculé de manière que l'erreur 6 soit insignifiante ;

7° La cause 7 d'erreur est loin d'être particulière au joulemètre, mais la correction correspondante (2 à 3 o/oo pour les mesures que nous avons effectuées) est très facilement calculable. On pourrait d'ailleurs construire un joulemètre compensé qui ne présente pas ce défaut. Il suffirait de placer parallèlement aux bobines « ampères » deux autres bobines en série avec le circuit des volts, et présentant avec le cadre mobile la même induction mutuelle que les bobines des ampères.

16. Conclusion. — La plupart des erreurs systématiques possibles sont négligeables ou s'éliminent à condition de prendre certaines précautions. Le joulemètre est un appareil commode, de construction facile et permettant de mesurer rapidement et mieux qu'au millième près toutes sortes d'énergies électriques, même dans les cas où la tension et l'intensité varient rapidement (énergie dissipée dans une étincelle, dans la fusion d'un fil de plomb...). On peut même étendre le champ des mesures à d'autres grandeurs que l'énergie. Par exemple, la mesure de l'aire d'un cycle d'hystérésis peut se faire en plaçant l'échantillon ferromagnétique dans un transformateur sans fer, dont le primaire est en série avec le circuit « intensité » du joulemètre. Le secondaire est relié directement au cadre des volts. On peut constater facilement que, dans ces conditions, l'indication du joulemètre est proportionnelle à l'aire cherchée $\int H dB$.

17. Caractéristiques. — A titre d'indication, voici les ordres de grandeur des principales constantes de l'appareil que nous avons construit.

Induction mutuelle des deux circuits. — $0{,}94.10^{-4}$ henry.

Bobines des ampères. — Chacune a 140 spires de fil de 2 mm. Rayon extérieur : 5 cm. 6. Distance des centres des bobines : 5 cm. 8.

Cadre des volts. — 550 spires de fil de 0 mm. 2. Surface totale : 414 cm^2. Self-induction : 2.10^{-3} henry. Résistance : 130 ohms. Résistance du circuit des volts avec résistance additionnelle : 2 150 ohms.

Amortissement. — Valeur de la constante a de l'équation (1) : 500 CGS. La spire de cuivre jouant le rôle d'amortisseur a environ 5 cm. de large et 10 cm. de haut. Elle est constituée avec un fil de 0 cm^2 46 de section.

Constante de torsion du fil F. — 0,21 c. g. s.

Moment d'inertie de l'équipage mobile. — 610 c. g. s.

Sensibilité. — *a*) Avec la résistance additionnelle : 2 mm. 09 par joule sur l'échelle placée à 3 m. ; *b*) Sans résistance additionnelle : 34 mm. 6 par joule sur la même échelle.

Variation thermique de la sensibilité. — 0,83 o/oo par degré.

Marche d'une mesure

18. Etalonnages. — Le four étant en circuit depuis plusieurs heures, lorsqu'on estime que, grâce à l'atmosphère d'hydrogène, l'équilibre thermique est réalisé, on peut profiter de l'occasion pour étalonner le couple d'Imphy et la résistance de platine en fonction du couple de platine-platine rhodié ([6]), qui, lui-même, a été étalonné au préalable par quelques points fixes, tels que l'ébullition de l'eau, du soufre, la fusion de l'or ([7]).

Un potentiomètre P_1 de précision (sans fil calibré, système Néel (20) à deux circuits indépendants à plots) peut être mis en relation successivement avec :

le couple de platine,

le couple d'Imphy (E),

les bornes de la résistance de platine (U),

les bornes d'une résistance étalon R_2 parcourue par le même courant I que la résistance de platine.

Cette opération étant effectuée, les pompes sont mises en mar-

([6]) Afin de ne pas compliquer inutilement le schéma de la figure 9, nous avons préféré ne pas y représenter ce couple, ni d'ailleurs le circuit de chauffe du four.

([7]) La résistance de platine devant être étalonnée avec une grande précision, nous avons attaché plus d'importance aux étalonnages faits à des températures voisines des points fixes cités, qu'à ceux faits à des températures intermédiaires.

che et l'on attend un certain temps, afin que les températures Θ et Θ' de l'échantillon et de l'enceinte aient une marche linéaire. On ne peut pas attendre en effet que ces températures soient constantes. Il suffit qu'elles varient assez peu pour qu'on puisse,

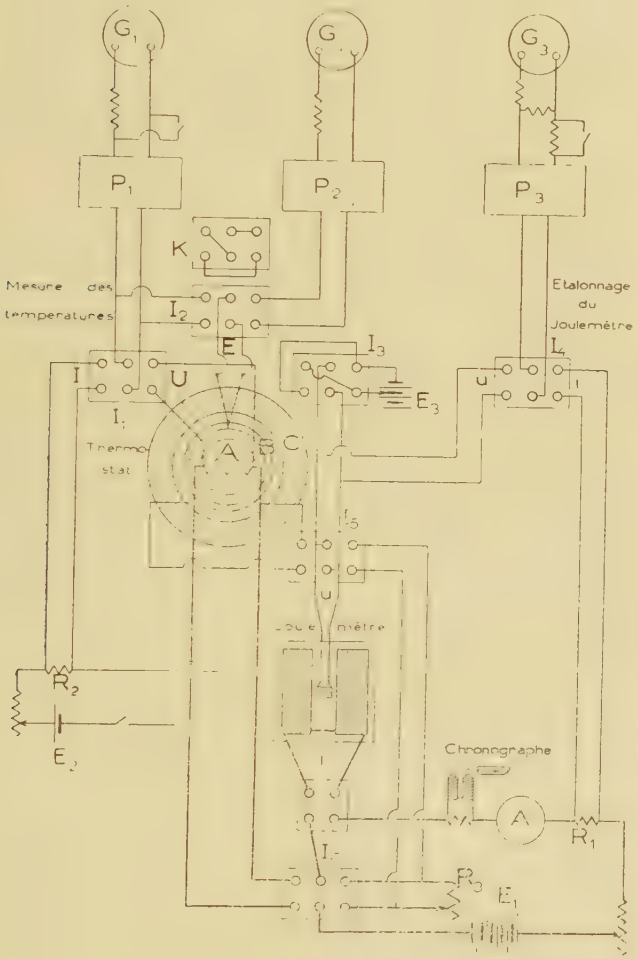

Fig. 9. — Schéma de l'installation.

sans commettre une trop grande erreur, supposer qu'elles varient linéairement.

On procède alors aux mesures de « sensibilité ». Au moyen de l'inverseur I_1 on met le potentiomètre P_1 en relation avec U (tension aux bornes du thermomètre à résistance) et l'on mesure le déplacement du spot du galvanomètre correspondant G_1, qui est produit par une variation connue de la tension de P_1 qu'on oppose à U. Un potentiomètre P_2 est opposable à la force électromotrice E du couple d'Imphy. Pour étalonner le galvanomètre de P_2, on met en série P_2, E et P_1 au moyen d'un commutateur K placé sur l'inverseur I_2 (8). On mesure sur l'échelle de G_2 combien de millimètres correspondent à une variation connue de la tension de P_1.

19. Mesure. — On peut commencer à suivre la marche des températures : l'intensité I est à peu près constante ; on la mesure (à l'aide de P_1) seulement au début et à la fin de l'expérience.

P_1 est en relation avec U,

P_2 est en relation avec E.

De minute en minute, pendant 10 minutes, on lit et on note les positions des spots de G_1 et de G_2. Connaissant la « sensibilité » du potentiomètre P_1, on pourra facilement convertir en microvolts l'écart qui existe entre le spot et le zéro de G_1, et ajouter ceci à l'indication du potentiomètre, afin d'avoir U à chaque minute pour en tracer la courbe.

Il est inutile d'autre part de connaître E en valeur absolue. Seule sa variation est intéressante. P_2 n'a pas besoin d'être étalonné si l'on s'arrange pour que le spot de G_2 ne sorte pas de l'échelle, ce qui est toujours possible, car il est inutile de connaître avec précision la variation de E.

Pendant ces 10 minutes on fait déjà passer dans le circuit « ampères » du joulemètre (et dans la résistance R_3) le courant qui servira à échauffer l'échantillon, afin de déterminer le zéro de l'appareil dont nous avons parlé plus haut (§ 15, erreur 3). On marque avec trois index de papier sur l'échelle du joulemètre :

1° Le zéro ;

2° Le point de départ du spot ;

(8) On a soin de court-circuiter le galvanomètre G_1 afin que la résistance de P_1 reste négligeable et ne modifie pas la sensibilité que l'on cherche.

3° La division sur laquelle il faudra l'arrêter.

Après la dixième minute, on met P_1 hors circuit. On coupe I. A l'aide d'une tension auxiliaire E_3, appliquée au cadre des volts du joulemètre, on amène le spot de celui-ci un peu au delà de l'index « point de départ ». Le spot y revient alors très lentement, grâce à la torsion du fil de suspension. Pendant ce temps on met le cadre des volts en relation avec l'enroulement de platine (inverseur I_5). Lorsque le spot passe juste sur l'index (dont on a lu la position avec précision) on met la résistance de platine en circuit (inverseur I_6). On note l'instant où le spot passe par l'index zéro (instant milieu du chauffage), et l'on coupe le courant un peu avant l'index « arrivée », de manière que l'inertie du cadre l'y amène. On lit avec soin l'élongation maxima du spot.

Ce chauffage a duré environ 20 secondes. On met hors circuit le cadre des volts du joulemètre et on rétablit l'intensité faible I à travers l'enroulement de platine. On attend environ 2 minutes, afin que l'équilibre thermique se rétablisse à l'intérieur de l'échantillon, puis on cherche à mesurer la nouvelle tension U. On note la nouvelle indication de P_1, puis, de minute en minute pendant 10 minutes, les positions des spots de G_1 et de G_2.

20. Dépouillement — On porte sur un même graphique (fig. 10) les variations de U et de E en millimètres des échelles avant (U_0 et E_0) et après (U_1 et E_1) le chauffage. On prolonge les courbes U_0 et E_0 qui sont à peu près des droites et on note les écarts ΔU et ΔE qu'elles font avec U_1 et E_1. Après conversion de ces écarts en microvolts, on calcule pour chaque minute la fonction Z dont nous avons parlé (§ 7) :

$$Z = \theta + \frac{M'}{M}\theta',$$

θ et θ' étant cette fois les écarts, déduits de ΔU et de ΔE, que font les températures Θ et Θ' avec les valeurs Θ_0 et Θ_0' qu'elles auraient, si l'on n'avait pas perturbé l'équilibre thermique du système par le chauffage de l'échantillon.

A moins d'un étalonnage préalable de la résistance de platine et du couple d'Imphy, le dépouillement complet ne peut se faire qu'à la fin d'une série de mesures. La résistance de platine peut se mettre sous la forme :

$$R = R_0(1 + a\Theta + b\Theta^2),$$

ce qui nous permet de définir la quantité σ :

$$\sigma = \frac{dU}{d\Theta} = IR_0 \frac{a + 2b\Theta}{1 + \frac{R}{R_1}},$$

Θ, température de l'échantillon,

R, résistance de platine,

R_1, grande résistance en série avec la résistance de platine (9), formule où nous prenons pour Θ et pour R les valeurs moyennes

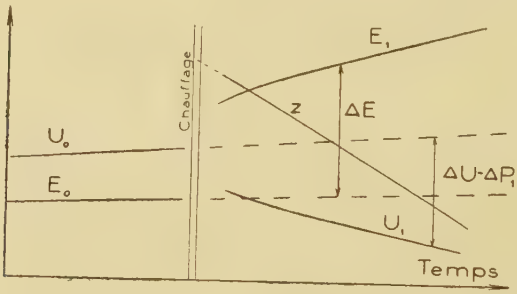

Fig. 10. — Dépouillement.

pendant le chauffage. Sur la courbe qui représente E en fonction de Θ, on relève la pente σ' :

$$\sigma' = \frac{dE}{d\Theta}.$$

Comme il s'agit de petits intervalles de température, nous calculons les valeurs de θ et de θ' par :

$$\theta = \frac{\Delta U}{\sigma}, \qquad \theta' = \frac{\Delta E}{\sigma'}.$$

M' s'obtient connaissant la masse de l'enceinte B, la chaleur spécifique du cuivre et les capacités calorifiques des accessoires (mica, quartz). Pour M, on choisit une valeur arbitraire mais probable. On porte alors sur un graphique (fig. 10) les valeurs de Z ainsi calculées. On trouve dans la plupart des cas une courbe se rapprochant beaucoup d'une droite et très facile à

(9) Le terme $\frac{R}{R_1}$ est de l'ordre de 1 o/o et ne peut donc pas être négligé.

extrapoler vers l'instant milieu du chauffage. Soit Z_m le résultat de l'extrapolation. On a :

$$JMZ_m = W.$$

W étant l'énergie (en joules) indiquée par le joulemètre, la correction n° 7 étant effectuée,

J étant l'équivalent mécanique de la calorie.

La valeur de M ainsi obtenue permet de recalculer les différentes valeurs de Z, pour obtenir ensuite la valeur définitive de M. Après correction des capacités calorifiques des accessoires (mica, nichrome, platine...) on en déduit la chaleur spécifique de l'échantillon.

L'erreur sur l'énergie est inférieure à 1 millième. L'erreur sur l'élévation de température est de l'ordre de 3 à 4 millièmes. L'erreur sur la chaleur spécifique vraie est par suite inférieure à 5 millièmes.

RÉSULTATS OBTENUS

Le nickel pur a été étudié par M. Néel (1) suivant cette méthode. Comme nous l'avons dit (§ 12), la température de l'échantillon était mesurée par un deuxième couple d'Imphy. Nous avons fait quelques mesures sur le cuivre, afin d'être sûr de bien posséder la méthode, puis nous avons étudié deux alliages de nickel et de cuivre.

21. Cuivre. — Les mesures qui ont été faites sont rassemblées au tableau I.

TABLEAU I

Chaleur spécifique vraie du cuivre.

t° C	Chal. spéc.
88,5	0,0936
14,3	0,0916
14,1	0,0911
274,7	0,0997
367,3	0,1027

La comparaison avec les déterminations antérieures est satisfaisante.

22. **Alliages nickel-cuivre.** — Les deux alliages étudiés sont les suivants :

N° 1	25 o/o Ni	75 o/o Cu
N° 2	50 o/o Ni	50 o/o Cu

Ils ont été obtenus en fondant au four à induction les quantités voulues de cuivre électrolytique et de nickel Mond en billes. Les résultats bruts sont rapportés aux tableaux II et III et rassemblés sur les graphiques des figures 11 et 12.

TABLEAU II. *Alliage 1.*

t° C	c_p
163,1	0,1023
287,1	0,1060
68,5	0,0983
15,9	0,0960
15,6	0,0962
201,6	0,1036
321,5	0,1070

TABLEAU III. *Alliage 2.*

t° C	c_p
17,3	0,0962
15,9	0,0958
99,4	0,1013
184,5	0,1060
252,5	0,1079
353,5	0,1100
67,1	0,0999
120,5	0,1024
206,6	0,1059

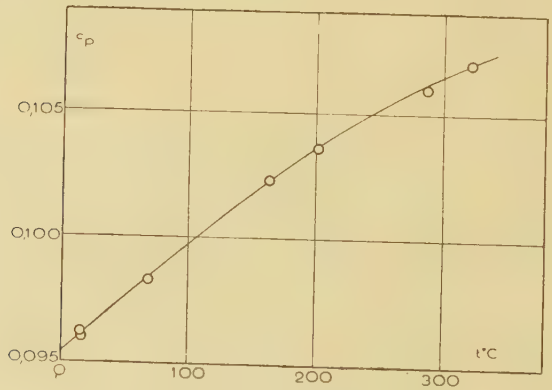

Fig. 11. — Chaleur spécifique de l'alliage 1.

Les graphiques permettent de déterminer de 5o° en 5o° les chaleurs spécifiques vraies et par suite les chaleurs atomiques vraies (10).

Tableau IV

Ensemble des résultats obtenus sur les alliages de cuivre et de nickel.

t° C	Alliage n° 1		Alliage n° 2	
	c_p	C_p	c_p	C_p
0	0,0954	5,94	0,0948	5,79
50	0,0976	6,08	0,0985	6,01
100	0,0997	6,21	0,1016	6,20
150	0,1017	6,33	0,1042	6,36
200	0,1036	6,45	0,1063	6,49
250	0,1052	6,55	0,1079	6,58
300	0,1065	6,63	0,1091	6,66
350	0,1075	6,70	0,1100	6,71

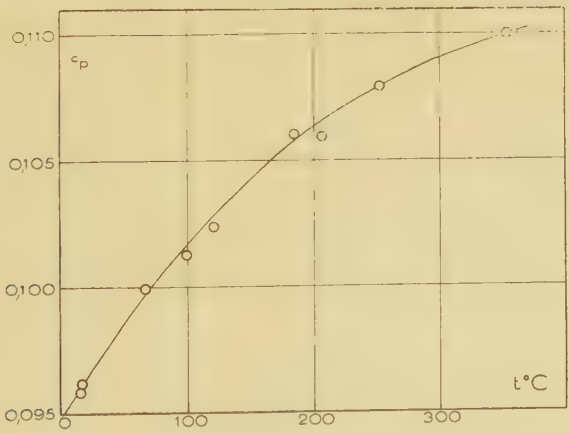

Fig. 12. — Chaleur spécifique de l'alliage 2.

(10) Les valeurs adoptées pour les masses atomiques sont 62,27 pour l'alliage 1 et 61,03 pour l'alliage 2.

23. Corrections de dilatation et de dégénérescence quantique. — Pour convertir ces chaleurs atomiques à pression constante en chaleurs atomiques à volume constant, nous nous sommes servi de la formule classique :

$$C_p - C_v = A \frac{T}{J} \frac{\alpha^2}{\delta\gamma},$$

A masse atomique moyenne,
α coefficient de dilatation cubique,
δ densité,
γ compressibilité,
T température absolue,
J équivalent mécanique de la calorie.

Coefficients de dilatation cubique. — Nous avons pris des valeurs intermédiaires entre celles données par un bon nombre d'auteurs parmi lesquels nous pouvons citer Krupkowski (21) et Johansson (22).

Tableau V

Coefficients de dilatation cubique.

t° C	Coeff. de dilat. cub.	
	Alliage 1	Alliage 2
0	$44,85.10^{-6}$	$42,15.10^{-6}$
50	45,6	42,96
100	46,65	43,95
150	47,7	45,0
200	48,66	46,2
250	49,8	47,31
300	50,85	48,48
350	52,05	49,50

Densités. — Nous avons dû nous contenter d'interpoler linéairement entre les densités du cuivre et du nickel. A 18° C. nous avons admis pour ces métaux les valeurs 8,90

et 8,86, d'où les densités 8,89 et 8,88 pour les deux alliages à cette même température. A partir du coefficient de dilatation donné par le tableau V, nous avons calculé les densités aux différentes températures.

Tableau VI

Densités.

t° C	Densité	
	Alliage 1	Alliage 2
0	8,90	8,89
50	8,88	8,87
100	8,86	8,85
150	8,84	8,83
200	8,81	8,81
250	8,79	8,79
300	8,77	8,77
350	8,75	8,75

Compressibilité. — En l'absence de données précises sur le coefficient de compressibilité des alliages Cu-Ni, nous avons dû interpoler entre les coefficients du cuivre pur et du nickel pur. Pour ce dernier nous avons admis les chiffres de Mme Lapp (10), qui a mesuré elle-même le module d'Young du nickel aux différentes températures, pour en déduire le coefficient de compressibilité, en supposant le coefficient de Poisson constant et égal à 0,309, valeur indiquée par Grüneisen (23). Le module d'Young E du cuivre varie dans d'assez larges proportions suivant le traitement thermique ou mécanique subi. Nous avons adopté les valeurs de Mitinsky (24). Pour le coefficient de Poisson nous avons admis la valeur 0,34 donnée par Grüneisen (23). Nous avons

effectué entre les métaux purs une interpolation linéaire en fonction du titre, mais nous n'affirmons pas que ce soit la bonne méthode.

Tableau VII

Compressibilité γ des alliages (en mm^2 par Kgp).

t° C	γ nickel	E cuivre	γ cuivre	γ alliage 1	γ alliage 2
0	$0{,}558.10^{-4}$	$1{,}280.10^{-4}$	$0{,}750.10^{-4}$	$0{,}702.10^{-4}$	$0{,}654.10^{-4}$
50	0,565	1,254	0,765	0,715	0,665
100	0,575	1,228	0,782	0,730	0,678
150	0,587	1,200	0,800	0,747	0,693
200	0,599	1,170	0,821	0,765	0,710
250	0,612	1,136	0,845	0,787	0,729
300	0,629	1,100	0,873	0,812	0,751
350	0,648	1,062	0,904	0,840	0,776

Les valeurs obtenues pour la correction $C_p - C_v$ de dilatation figurent au tableau VIII.

Tableau VIII

Correction de dilatation.

t° C	Alliage 1	Alliage 2
0	0,128	0,119
50	0,154	0,145
100	0,183	0,172
150	0,213	0,200
200	0,243	0,231
250	0,274	0,262
300	0,304	0,293
350	0,335	0,322

Correction de dégénérescence quantique. — Nous avons admis, pour les températures caractéristiques de Debye, 375° K. pour le nickel et 315° K. pour le cuivre (42). En interpolant linéairement en fonction du titre atomique, on obtient :

pour l'alliage 1. 330° K.,
pour l'alliage 2. 345° K.

Les corrections de dégénérescence quantique, calculées d'après la formule de Debye (25), sont données au tableau IX.

TABLEAU IX

Correction de dégénérescence quantique.

t° C	$C_\infty - C_D$	
	Alliage 1	Alliage 2
0	0,411	0,449
50	0,297	0,325
100	0,227	0,245
150	0,178	0,194
200	0,143	0,156
250	0,117	0,128
300	0,098	0,107
350	0,082	0,090

24. Résultats. — Voici finalement, pour faciliter les interprétations théoriques, les valeurs des chaleurs spécifiques, figurant au tableau X, sur lesquelles sont effectuées les corrections de dilatation et de dégénérescence, mais nous insistons sur le fait que ces corrections sont peu sûres. Les valeurs relatives au cuivre pur, calculées de la même manière à par-

tir des données citées plus haut, figurent dans la deuxième colonne de ce tableau.

TABLEAU X

C_v corrigée.

t° C	Cuivre	Alliage 1	Alliage 2
0	6,02	6,22	6,12
50	6,02	6,22	6,19
100	6,02	6,25	6,27
150	6,04	6,29	6,35
200	6,08	6,35	6,41
250	6,12	6,39	6,45
300	6,18	6,42	6,47
350	6,23	6,44	6,48

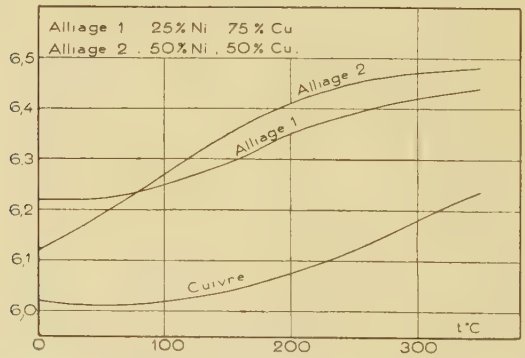

Fig. 13. — Chaleurs spécifiques corrigées du cuivre et des alliages 1 et 2.

Les courbes correspondantes sont représentées figure 13.

DEUXIÈME PARTIE

25. **Rappel des méthodes de fil les plus connues.** — Rappelons les formes les plus typiques des méthodes de fil. Dans tous les cas la chaleur est fournie par un courant électrique traversant le fil. L'élévation de température se mesure soit par un couple thermoélectrique, soit par le fil lui-même, constituant un thermomètre à résistance.

Citons d'abord quelques auteurs qui ont employé le premier procédé. Nous avons déjà signalé (§ 4) l'inconvénient qu'il présente.

Lecher (12) a fait des mesures relatives en envoyant le même courant (une quinzaine d'ampères pendant 30 secondes) dans l'échantillon (diam. 3 mm.) maintenu à la température pour laquelle on veut faire l'expérience, et dans un fil de référence en constantan à la température de la salle. Il compare les élévations de température avec des couples placés au voisinage des milieux des fils.

Plus récemment Ahrens (11) a perfectionné ce principe en envoyant simultanément dans les deux fils (diam. 2 mm. 5) des courants différents, choisis de manière qu'un couple cuivre-constantan, ayant une soudure sur chaque fil, donne pendant les 4 à 8 premières secondes une force électromotrice nulle. Il suffit alors de comparer les courants et les sensibilités du couple, aux températures des deux fils. L'auteur estime que les pertes de chaleur sont négligeables aux températures inférieures à 460° où il a travaillé.

Mme Lapp (10) mesure au wattmètre et au chronomètre l'énergie qu'elle envoie en 30 ou 40 secondes dans un fil de 2 mm. de diamètre. L'élévation de température qui est de

1° à 2° se mesure par un couple d'Imphy. Les corrections de pertes de chaleur, qui sont considérables, se déterminent par la courbe de refroidissement du fil.

Parmi les auteurs qui ont employé le fil lui-même comme thermomètre à résistance — et ceci paraît plus logique — on remarque particulièrement les suivants.

Harper (13) pour mesurer la chaleur spécifique du cuivre à température ordinaire (0° à 50° C.) a enroulé sur lui-même un fil de ce métal de 50 m. de long et de 2 mm. 5 de diamètre. Les spires sont isolées les unes des autres par du mica et l'ensemble est placé dans le vide. Ce fil est chauffé par un courant de 6 ampères environ pendant 7 à 8 minutes. L'énergie mise en jeu est mesurée au potentiomètre et au chronographe. L'élévation de température qui est de 3° à 5° s'évalue par l'augmentation de résistance de l'échantillon que l'on compare à une résistance étalon à l'aide d'un potentiomètre. Les pertes de chaleur sont de l'ordre de 3 o/oo. On les détermine par la courbe de refroidissement. La précision atteinte semble excellente. Les points obtenus présentent entre eux des écarts de l'ordre du millième.

Behrens et Drucker (14) mesurent la résistance du fil (0 mm. 2) à l'aide d'un pont de Wheatstone. Un commutateur tournant réalise successivement les connexions nécessaires au réglage du pont et à l'expérience proprement dite. L'intensité qui traverse le fil est lue sur un ampèremètre de précision. L'énergie peut s'en déduire connaissant le temps de passage (environ 1 sec., constante du commutateur) et la résistance moyenne du fil. La quantité de chaleur perdue se calcule par la vitesse de refroidissement du fil, qu'on détermine en effectuant une mesure de résistance 4 secondes après la fin du chauffage.

Pirani (17) enregistre à l'aide d'un oscillographe la courbe de l'intensité du courant en fonction du temps, la tension aux bornes du fil restant constante. Pour chaque fraction de cette courbe, on calcule l'énergie et la variation de résis-

tance correspondante. Pour avoir une idée de la chaleur perdue, on envoie dans le fil un courant constant de manière que la température stationnaire qui en résulte soit voisine de la température moyenne du fil dans l'intervalle considéré.

Corbino a indiqué deux méthodes (15 et 16) dont nous ne retiendrons que la première qui est ingénieuse. Un pont de Wheatstone est constitué comme l'indique la figure 14,

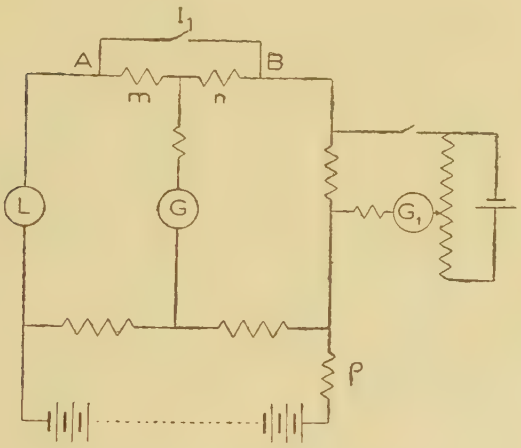

Fig. 14. — Méthode Corbino.

l'échantillon étant en L. Il est réglé pour que le courant soit nul dans le galvanomètre G pour les deux états stationnaires suivants :

1° L'interrupteur I_1 est ouvert. Les résistances m et n sont en circuit. Un certain courant traverse le fil L ;

2° L'interrupteur I_1 est fermé. m et n sont en court-circuit. Il passe dans le fil un courant plus fort que le précédent. La variation de résistance de l'échantillon est com-

pensée, au point de vue du réglage du pont, par la suppression des résistances m et n.

Si on passe brusquement d'un état à l'autre, le pont est déréglé lorsque la résistance du fil n'a pas encore atteint sa seconde valeur limite, et la quantité d'électricité qui passe dans le galvanomètre G_1 (fonctionnant en balistique) est proportionnelle à la chaleur spécifique de l'échantillon. Le coefficient de proportionnalité s'obtient en court-circuitant la résistance ρ, de façon que l'échantillon soit traversé par le même courant que dans le deuxième état stationnaire (on le contrôle à l'aide du potentiomètre indiqué sur la figure 14), mais m et n étant en circuit.

Utilisation du courant alternatif. — Montrons qu'il est facile de se servir du courant alternatif pour mesurer une capacité calorifique. Choisissons un échantillon de fil fin et faisons-le parcourir par un tel courant. Sa température oscille entre deux valeurs extrêmes qui dépendent de sa masse calorifique. Sa résistance fait de même et, s'il constitue l'une des branches d'un pont de Wheatstone réglé pour la résistance moyenne, il passe dans la diagonale du pont un courant alternatif en première approximation inversement proportionnel à la capacité calorifique du fil. Une méthode basée sur ce principe permettrait, connaissant la manière dont varie la résistance du fil en fonction de sa température, de tracer rapidement toute la variation thermique de la chaleur spécifique.

Corbino (26) semble être le premier à préconiser l'utilisation d'un courant alternatif (mais sans pont) pour mesurer une capacité calorifique. Il fit même quelques essais et enregistrements (27) sur le filament de tungstène d'une lampe à incandescence. Hunkel (28) et Bockstahler (29) déterminèrent l'amplitude des variations de température par les variations de l'émission électronique du filament.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

26. Notations. — Pour les lettres désignant des objets particuliers, se reporter aux figures correspondantes.

R résistance utile du fil métallique AB en expérience.

R_0 résistance initiale du même fil.

R′ résistance de référence CD en maillechort.

r résistance de la branche BC du pont.

r_1 résistance de la branche CE du pont.

r_2 résistance de la branche BE du pont.

r_3 résistance de la branche DF du pont.

r_4 résistance de la branche AF du pont.

ρ_2 résistance de la diagonale EF du pont.

i courant total, passant dans les bobines « ampères ».

i' courant d'étalonnage.

I courant dans le fil en expérience.

j courant dans la diagonale EF du pont.

u tension entre les extrémités de la diagonale EF.

K coefficient de proportionnalité entre u et $i\Delta R$.

U_1 tension d'étalonnage du premier wattmètre.

U_2 tension d'étalonnage du deuxième wattmètre (à introduire dans la branche AF du pont, entre les points M et N).

U′ tension destinée à compenser en EF les forces électromotrices parasites.

$P_1 = U_1 i'$.

$P_2' = U_2 i'$.

t temps compté à partir du début de l'expérience.

t_0 durée de l'expérience.

Θ température initiale du fil.

θ augmentation de la température du fil.

θ_0 valeur de θ à la fin du chauffage.

μ masse calorifique du fil à la température initiale Θ.

ν variation thermique de la masse calorifique.

M masse calorifique du fil à la température $\Theta + \frac{\theta_0}{2}$.

J équivalent mécanique de la calorie

a, b, c coefficients du développement de R en fonction de la température : $R = a + b(\Theta + \theta) + c(\Theta + \theta)^2$.

p premier coefficient du développement de $\frac{\Delta R}{R}$ en fonction de la variation θ de température.

A, B, C, D fonctions des résistances du pont.

Γ puissance perdue par le fil, en watts par degré d'écart avec l'enceinte.

Wattmètres

Les lettres affectées de l'indice 1 représentent les grandeurs relatives au premier wattmètre (mesure de l'énergie). L'indice 2 indique qu'il s'agit du deuxième wattmètre (mesure de l'élévation de température). L'absence d'indice dans une équation relative aux wattmètres signifie que cette équation est valable pour les deux appareils.

W énergie mesurée par l'appareil (balistique).

P puissance mesurée par l'appareil (étalonnage).

α angle que fait le cadre des volts avec sa position d'équilibre.

β élongation maxima (balistique).

γ déviation du cadre (étalonnage).

α_0 angle dont a déjà tourné le cadre lorsqu'on coupe le courant (balistique).

ω_0 vitesse angulaire du cadre à l'instant t_0 (balistique).

σ sensibilité de l'appareil en millimètres par joule (balistique).

Σ sensibilité de l'appareil en millimètres par watt (étalonnage).

H rapport des deux sensibilités : $\frac{\sigma}{\Sigma}$.

$\mathfrak{M}$ induction mutuelle des deux circuits, « ampères » et « volts ».

A amortissement constant de l'équipage mobile.

λ décrément des oscillations.

$\mathcal{J}$ moment d'inertie.

C constante de torsion.

T pseudopériode.

Ω pseudopulsation.

t_0 instant où l'on coupe le courant.

t_m instant où le cadre s'arrête pour la première fois (balistique).

ρ résistance du cadre des volts.

Principe. (2). — Le métal dont on veut étudier la chaleur spécifique est disposé, en forme de fil, dans un four, que l'on porte à la température choisie pour l'expérience. Lorsque l'équilibre thermique est atteint, on envoie pendant un temps très court t_0 un courant électrique dans le fil, qui s'échauffe alors brusquement. Si la mesure de cette élévation de température peut se faire instantanément, la rapidité de l'expérience rend petites et quelquefois négligeables les corrections dues aux pertes de chaleur du fil.

L'énergie W_1 reçue par le fil se mesure avec un premier wattmètre balistique :

$$W_1 = \int_0^{t_0} R i^2 dt. \tag{3}$$

Montrons que l'échauffement de l'échantillon peut se mesurer avec un deuxième wattmètre balistique. On peut en effet

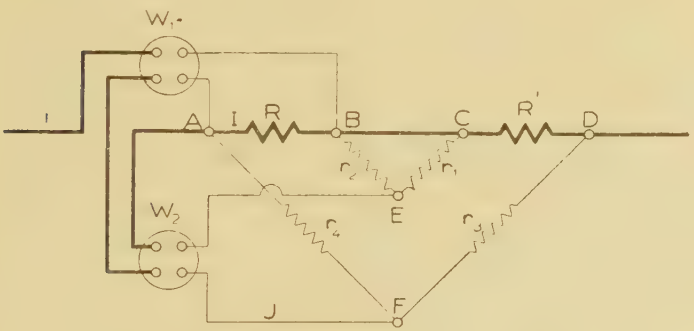

Fig. 15. — Principe de la deuxième méthode.

constituer un double pont de Thomson (fig. 15) destiné à comparer la résistance R du fil AB à une résistance R′ invariable placée en CD. Le pont est au préalable réglé au moyen d'un galvanomètre placé sur la diagonale EF. La tension u qui apparaît au cours de l'expérience entre les extrémités de

la diagonale, est proportionnelle à i et à l'augmentation ΔR de R. Posons :

$$u = Ki\Delta R. \tag{4}$$

K dépend des résistances du pont, mais peut être éliminé lors de l'étalonnage des wattmètres (§ 28). Le circuit des volts du second wattmètre balistique est placé sur la diagonale EF du pont, et le circuit des ampères parcouru par le courant i. Son indication W_2 est donc :

$$W_2 = \int^{t_0} uidt = K \int_0^{t_0} \Delta R i^2 dt.$$

La masse calorifique M du fil est donnée par l'équation :

$$JMd\theta = Ri^2dt, \tag{5}$$

θ élévation de température depuis l'état d'équilibre.

On a donc :

$$W_2 = KJM \int_0^{\theta_0} \frac{\Delta R}{R} d\theta.$$

Si l'élévation de température θ_0 est faible, nous pouvons nous limiter au premier terme du développement de $\frac{\Delta R}{R}$ en fonction de θ. Sinon nous aurons à effectuer ce que j'appellerai plus loin (§ 39) une correction de courbure. Posons donc :

$$\frac{\Delta R}{R} = p\theta,$$

ce qui nous donne finalement :

$$JM = \frac{1}{2} Kp \frac{W_1^2}{W_2}. \tag{6}$$

Ce calcul est valable quelle que soit la forme du courant i pendant l'expérience.

28. Etude particulière du pont de Thomson. — Avant d'aborder l'étude plus approfondie de la méthode, nous allons rappeler les résultats relatifs au pont de Thomson lui-même.

Pour étalonner le wattmètre W_2 on introduit au moyen de l'interrupteur K_{11} (fig. 20), entre deux points M et N de l'une des branches, normalement au même potentiel, une tension auxiliaire U_2. D'autre part il se crée toujours dans les différentes branches du pont, principalement dans celles qui sont chaudes, des forces électromotrices thermoélectriques. Pour les compenser on a introduit dans la branche AF un dispositif à résistance constante, permettant d'intercaler une tension U′ auxiliaire et réglable. i et U_2 étant nuls, j, courant dans la diagonale EF, doit être aussi nul.

Si on appelle r, r_1, r_2, r_3, r_4, R et R′ les différentes résistances du pont, disposées comme l'indique la figure 15, ρ_2 la résistance du circuit des volts du wattmètre W_2, on a à chaque instant un courant j de la forme :

$$j = \frac{iA + U_2 B}{C},$$

avec :

$$A = r(r_2 r_3 - r_1 r_4) + (r + r_1 + r_2)(R r_3 - R' r_4),$$
$$B = r r_1 + (r + r_1 + r_2)(R' + r_3),$$
$$C = \rho_2 [r(r_1 + r_2) + (r + r_1 + r_2)(R + r_4 + R' + r_3)] + [r r_1 + r_1 r_2 + (r + r_1 + r_2)(R' + r_3)](R + r_4) + (R' + r_3)(r + r_1) r_2 + r r_1 r_2.$$

Le pont est réglé ($j = 0$) à l'aide d'une intensité i insuffisante pour échauffer R d'une manière sensible. On lance alors le courant fort, qui fait augmenter R de la quantité ΔR. On a :

$$j = \frac{i \Delta A}{C + \Delta C},$$

avec :

$$\Delta A = (r + r_1 + r_2) r_3 \Delta R ;$$
$$\Delta C = \rho_2 (r + r_1 + r_2) \Delta R + [r r_1 + r_1 r_2 + (r + r_1 + r_2)(R' + r_3)] \Delta R.$$

Mais on choisit les résistances du pont assez grandes pour

que ΔC soit négligeable par rapport à C. La constante K de l'équation (4) a donc pour valeur :

$$K = \frac{\rho_2}{C} r_3(r + r_1 + r_2). \tag{7}$$

Lorsque, peu de temps après l'expérience, on étalonne le wattmètre W_2 en même temps que le pont, l'intensité i est nulle et l'on a :

$$j = \frac{U_2 B}{C}.$$

Pendant ce temps passe dans le circuit « ampères » du wattmètre une intensité i' constante que l'on mesure ainsi que U_2. La puissance constante P_2 qui agit sur l'appareil est :

$$P_2 = ui' = \rho_2 \frac{B}{C} U_2 i' = \rho_2 \frac{B}{C} P'_2,$$

si l'on pose :

$$P'_2 = U_2 i'.$$

Soit γ_2 la déviation correspondante. Il y a un rapport constant H_2, fonction des caractéristiques de l'appareil (§ 31) entre la sensibilité σ_2 de l'instrument fonctionnant en balistique et la sensibilité Σ_2 du même instrument fonctionnant normalement. Définisson Σ_2 par :

$$\Sigma_2 = \frac{\gamma_2}{\rho_2 \frac{B}{C} P'_2},$$

et H_2 par :

$$\sigma_2 = H_2 \Sigma_2. \tag{8}$$

Tenant compte de (5) il vient :

$$K\sigma_2 = \frac{(r + r_1 + r_2) r_3 H_2 \gamma_2}{B P'_2}.$$

Si β_2 est l'élongation maxima lue lors de la mesure, on a finalement :

$$\frac{W}{K} = \frac{\beta_2}{\gamma_2} \frac{P'_2}{H_2} \left(\frac{r r_1}{r_3(r + r_1 + r_2)} + \frac{R'}{r_3} + 1 \right). \tag{9}$$

Il est inutile de connaître avec précision les valeurs des différentes résistances, elles n'interviennent qu'à titre de correction, le crochet ayant une valeur très voisine de l'unité. C'est ce rapport $\frac{W_2}{K}$ qui intervient dans l'équation (6).

Il est bon de calculer l'influence d'une variation Δr de la résistance r de la branche BC. Cette résistance r est en effet parcourue par le courant fort, et, malheureusement, on ne peut pas la constituer sur toute sa longueur par du gros fil. Le courant en EF, qui résulte de Δr, peut avoir une valeur considérable, soit :

$$j_{\Delta r} = i \frac{r_2 r_3 - r_1 r_4 + R r_3 - R' r_4}{C} \Delta r.$$

Mais on voit qu'il suffit d'annuler les termes $r_2 r_3 - r_1 r_4$ et $R_0 r_3 - R' r_4$ au début de l'opération pour qu'il ne reste que :

$$j_{\Delta r} = i \frac{r_3}{C} \Delta R \Delta r,$$

soit une intensité négligeable. La condition est satisfaite en réalisant simultanément deux réglages du pont :

1° Le réglage habituel ;

2° Un réglage complémentaire effectué lorsque la résistance r est rendue infinie en coupant le circuit entre B et C grâce à l'interrupteur K_4. Il est évident qu'au moins deux des résistances du pont doivent être réglables, par exemple R' et r_3. Ces deux réglages entraînent la double égalité classique :

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4} = \frac{R'}{R_0}.$$

Le courant I qui traverse l'échantillon est en réalité différent de i. Le courant dérivé qui circule dans le cadre des volts du wattmètre W_1 est négligeable, mais celui qui circule dans la résistance r_4 du pont, peut ne pas l'être. I est

donné par :

$$I = iD, \tag{10}$$

où :

$$D \neq \frac{r_3 + r_4}{r_3 + r_4 + R + R' + r}.$$

Nous tiendrons compte plus loin (§ 39) de cette remarque, nous bornant pour l'instant à énoncer les résultats relatifs au pont lui-même.

Etude particulière des wattmètres balistiques

29. Définition. — De même qu'un galvanomètre balistique intègre *idt* pendant un temps très court pour donner la quantité totale d'électricité qui l'a traversé, le wattmètre balistique intègre *uidt* pendant un temps également très court, pour donner l'énergie totale dissipée dans une portion de circuit donnée.

30. Réalisation (30) (fig. 16). — Les appareils employés ont été entièrement construits à l'atelier de l'Institut de Physique de Strasbourg. Le circuit « ampères » se compose de deux bobines de Helmoltz fixes A et A'. Le cadre des volts est une petite bobine *v* d'ivoire suspendue par un fil de torsion en tungstène. Les amenées de courant sont constituées par des bandes de cupro-glucinium. L'équipage mobile comporte en outre à sa partie inférieure deux tiges horizontales supportant des masses de cuivre réglables M, destinées à augmenter le moment d'inertie, et un cylindre vertical de cuivre, placé dans l'entrefer parallélépipédique d'un aimant permanent P. Ce cylindre sert à amortir le mouvement du cadre, afin qu'on puisse utiliser l'appareil en wattmètre

ordinaire, ou faire successivement et rapidement plusieurs mesures en balistique. Cette forme de l'entrefer a été choisie

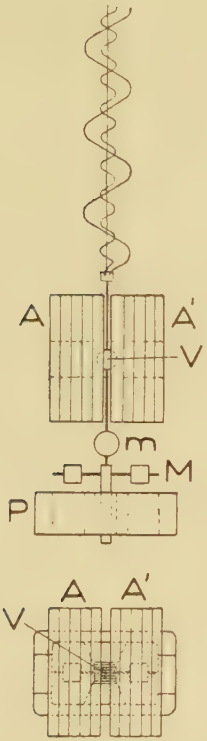

Fig 16. — Wattmètre balistique.

pour que l'amortissement ne dépende pas de la position relative du cylindre par rapport à l'aimant. Le tout est enfermé dans un cylindre creux en laiton.

31. **Etude des mouvements du cadre et des corrections à effectuer.** — Cette étude est nécessaire lorsque le temps t_0 de passage du courant n'est pas tout à fait négligeable.

Soit α_0 l'angle dont tourne le cadre pendant le passage du courant et ω_0 la vitesse angulaire acquise à l'instant t_0. On montre facilement que l'on a pour le wattmètre W_1 :

$$\frac{\alpha_0}{\omega_0} = \frac{t_0}{2} + \frac{A_1 t_0^2}{12\mathcal{J}_1},$$

et pour le wattmètre W_2 :

$$\frac{\alpha_0}{\omega_0} = \frac{t_0}{3} + \frac{A_2 t_0^2}{36\mathcal{J}_2},$$

à condition d'admettre les hypothèses suivantes :

1° Le couple agissant sur W_1 est constant pendant tout le temps du passage du courant ;

2° Le couple agissant sur W_2, nul au début du passage du courant, croît ensuite proportionnellement au temps.

Ces deux hypothèses, qui d'ailleurs ne jouent que dans le calcul de termes correctifs, ont été pleinement vérifiées par une étude à l'oscillographe.

L'équation différentielle du mouvement du cadre s'écrit :

$$\mathcal{J}\frac{d^2\alpha}{dt^2} + A\frac{d\alpha}{dt} + C\alpha = \mathfrak{M}ij \qquad (11)$$

(voir les notations § 26).

Intégrée entre les instants O et t_0, elle donne pour W_1 :

$$\omega_0\left(1 + \frac{A_1}{\mathcal{J}_1}\frac{\alpha_0}{\omega_0}\right) = \frac{\mathfrak{M}_1 W_1}{\rho_1 \mathcal{J}_1}\left(1 - \frac{C_1}{\mathcal{J}_1}\frac{t_0^2}{6}\right),$$

et pour W_2 :

$$\omega_0\left(1 + \frac{A_2}{\mathcal{J}_2}\frac{\alpha_0}{\omega_0}\right) = \frac{\mathfrak{M}_2 W_2}{\rho_2 \mathcal{J}_2}\left(1 - \frac{C_2}{\mathcal{J}_2}\frac{t_0^2}{12}\right).$$

L'étude de la seconde partie du mouvement du cadre, le couple agissant étant nul, fournit la première élongation maxima :

$$\beta = e^{-\frac{A}{2\mathcal{J}}(t_m - t_0)}\,\omega_0\sqrt{\frac{\mathcal{J}}{C} + \frac{A}{C}\frac{\alpha_0}{\omega_0} + \frac{\alpha_0^2}{\omega_0^2}}. \qquad (12)$$

Les rapports H dont nous avons parlé plus haut (§ 28) sont donc, en tenant compte de ce que le temps t_0 est petit :

$$(13)\quad H_1 = e^{-\frac{A_1}{2\mathcal{J}_1}(t_{m1}-t_0)} \sqrt{\frac{C_1}{\mathcal{J}_1}}\left[1-\frac{A_1 t_0}{4\mathcal{J}_1}-\frac{t_0^2}{24}\left(\Omega_1^2-\frac{A_1^2}{\mathcal{J}_1^2}\right)\right],$$

$$(13\ bis)\quad H_2 = e^{-\frac{A_2}{2\mathcal{J}_2}(t_{m2}-t_0)} \sqrt{\frac{C_2}{\mathcal{J}_2}}\left[1-\frac{A_2 t_0}{6\mathcal{J}_2}-\frac{t_0^2}{36}\left(\Omega_2^2-\frac{3A_2^2}{4\mathcal{J}_2^2}\right)\right].$$

Pratiquement on mesure la pseudopériode T et le décrément λ des oscillations. On calcule successivement :

$$\frac{A}{2\mathcal{J}} = \frac{1}{T}\,\mathrm{Lg}\,\lambda \qquad \Omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{C}{\mathcal{J}} = \Omega^2 + \left(\frac{A}{2\mathcal{J}}\right)^2$$

$$t_m - t_0 = \frac{1}{\Omega}\,\mathrm{arc\ tg}\,\frac{\Omega}{\frac{A}{2\mathcal{J}}+\frac{C}{\mathcal{J}}\,\frac{\alpha_0}{\omega_0}}$$

et enfin H_1 et H_2.

Il est nécessaire de connaître le temps t_0, de l'ordre de 0,1 sec., qui est la constante de l'interrupteur spécial (décrit § 35) que nous avons utilisé. Ce temps a été mesuré à l'aide d'un enregistreur à bande de papier noirci.

Ces formules comprennent l'ensemble des corrections provenant de ce que le temps t_0 n'est pas négligeable vis-à-vis des périodes des appareils.

Toutes les causes d'erreurs que nous avons signalées à propos du joulemètre (§ 15) se retrouvent ici, sauf la première (torsion du fil), si l'on suppose le fil de suspension parfaitement élastique. La seconde cause d'erreur, variations de $\frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial \alpha}$ n'existe pas lorsque l'appareil fonctionne en balistique, mais reste négligeable lorsque l'appareil fonctionne

en wattmètre ordinaire, à condition de ne pas dépasser certaines déviations. Pour les deux modes de fonctionnement et après chaque expérience, on mesure la déviation due au ferromagnétisme et au paramagnétisme du cadre mobile et aussi aux courants parasites qui y circulent, en faisant passer dans le circuit « ampères » seul, la même intensité que pendant la mesure, et pendant le même temps. On retranche ensuite cette déviation corrective de la déviation totale lue au moment de l'expérience.

Nous n'avons pas jugé utile de compenser les champs parasites, mais nous avons décidé de mesurer leur action à chaque expérience et pour les deux modes de fonctionnement en mettant le cadre des volts seul en circuit et en y faisant passer le même courant que pendant la mesure. La déviation ainsi mesurée se retranche de la lecture totale en même temps que celle de l'alinéa précédent.

Les erreurs provenant de la self-induction du cadre des volts ont été calculées dans le cas où l'appareil fonctionne en balistique. Elles sont négligeables pour les temps t_0 de chauffage habituellement employés (de l'ordre du dixième de seconde), comme d'ailleurs celles qui proviennent des courants induits dans le circuit des volts.

Enfin, comme le wattmètre W_1 est beaucoup trop sensible pour l'énergie à mesurer, nous avons disposé, en série avec le cadre des volts, une grande résistance, qui rend tout à fait négligeable l'erreur signalée sous le numéro 7 à propos du joulemètre (§ 15). Cette erreur n'existe pas pour le wattmètre W_2, puisque les deux circuits ne sont pas montés en dérivation, et nous avons déjà vu comment le courant j dépendait de la résistance ρ_2 du cadre (§ 28).

32. **Caractéristiques des appareils.** — Voici les ordres de grandeur des principales constantes des appareils utilisés.

Bobines des ampères. — Chacune a 49 spires de fil de 3 mm. Rayon extérieur 3 cm. Distance des centres des bobines 3 cm. 4.

Bobines des volts. — 550 spires de fil de 0 mm. 2. Surface totale 420 cm^2. Self 2.10^{-3} henry. Résistance 12 ohms pour W_1 et 28 ohms pour W_2 ([11]), mais le circuit « volts » du premier appareil comportait en outre une résistance additionnelle d'environ 1 000 ohms en série.

Induction mutuelle des deux circuits. — $0{,}31.10^{-4}$ henry.

Périodes. — 6,7 et 21,7 sec.

Décréments des oscillations. — 1,3 et 2,3.

Moments d'inertie. — 26 et 53 c. g. s.

Amortissements (constante A de l'équation (11)). — 2,05 et 4,04 c. g. s.

Constantes de torsion. — 23 et 4,5 c. g. s.

Sensibilités Σ. — Sans résistance additionnelle : 6 900 et 15 000 mm. par watt, sur une échelle placée à 3 m.

Sensibilités σ. — Dans les mêmes conditions : 6 000 et 3 600 mm. par joule.

Rapports H. — 0,88 et 0,24 c. g. s.

Ces appareils sont plus sensibles que le joulemètre, mais ne permettent pas de faire des mesures aussi précises, puisque les lectures doivent se faire lorsque le cadre n'est pas au repos.

Dispositif expérimental

33. Echantillon et enceinte. — Le fil échantillon (diam. 0 mm. 5) est disposé dans une enceinte cylindrique de fer destinée à uniformiser et à définir la température initiale. Cette enceinte est sciée en deux (fig. 17) suivant un plan diamétral et les deux moitiés sont maintenues à une certaine distance l'une de l'autre grâce à quatre tiges de quartz pénétrant dans leur épaisseur. Les parois du four les empêchent de s'éloigner l'une de l'autre. Chaque moitié porte une pince

([11]) Cette seconde résistance est plus grande que la première parce que les fils d'amenée de courant sont plus longs, mais les bobines « volts » sont identiques.

spéciale p à deux couteaux, destinée à prendre la tension en deux points bien définis du fil. Chaque extrémité de la partie

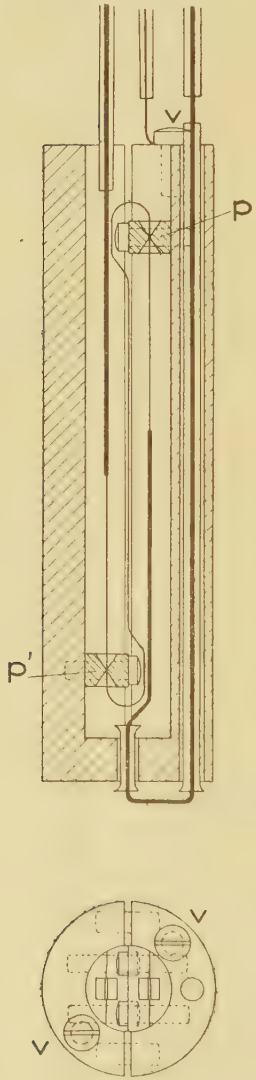

Fig. 17. — Enceinte de fer.

Fig. 18. — Four.

utile du fil est donc reliée à une moitié de l'enceinte. Chacune de celles-ci porte à sa partie supérieure une vis v fixant le fil de tension correspondant. Sous l'une des vis, on a glissé en outre la soudure d'un couple de platine-platine rhodié. Le courant est amené par les prolongements du fil en expérience lui-même, sur lesquels sont fixés à la soudure autogène de plus gros fils de nickel.

34. **Four** (fig. 18). — Le four se compose principalement d'un tube t de porcelaine fermé à la partie inférieure, et sur lequel est enroulée une bande de nichrome. Ce tube est placé dans un cylindre de laiton contenant de la poudre de silice comme isolant thermique. L'enceinte est suspendue dans ce four à la hauteur du maximum de température.

Les divers fils sont emprisonnés dans des tubes de porcelaine et non de quartz, car cet oxyde se combine à haute température à la plupart des métaux et particulièrement au platine. Primitivement d'ailleurs nous n'avions placé que les fils du couple de platine dans des tubes de porcelaine, les autres fils en nickel passant dans des tubes de quartz, mais, à plusieurs reprises, quelques-uns de ces fils se sont rompus malgré leur fort diamètre (1 mm.) sous le poids pourtant faible (240 g.) de l'enceinte de fer. Les cassures laissaient voir des cristaux internes bien plus grands que de coutume. Cet inconvénient ne s'est plus présenté, lorsque les tubes de silice ont été remplacés par des tubes de porcelaine.

Le four est fermé à la partie supérieure par un capuchon c de laiton fixé à la piscéine. Deux circulations d'eau maintiennent cette piscéine à l'état solide : l'une sur le capuchon lui-même, l'autre sur le tube t à 10 cm. du capuchon. On a disposé sous le capuchon un tampon d'amiante (traversé par les six fils) afin d'éviter que le rayonnement du centre du four ne vienne échauffer la piscéine. Au fond du four une série d'écrans de fer limitent le rayonnement vers le bas. Sur l'écran supérieur nous avons placé, pour chaque série de

mesures, une coupelle contenant du manganèse en poudre fine destiné à absorber l'oxygène de l'air. Un tube de laiton, traversant le capuchon *c*, est en relation avec un manomètre *m* à mercure, jouant en même temps le rôle de valve. Le four est étanche. Lorsqu'on le chauffe, une certaine quantité d'air s'échappe par la valve. L'oxygène de l'air restant est absorbé complètement par le manganèse et les mesures se font en atmosphère d'azote, de sorte que, sans qu'il soit nécessaire de faire le vide, le fer de l'enceinte ne présente pas la moindre trace d'oxydation, lorsque, après une série de mesures, on démonte le four; il est même brillant comme du platine.

35. **Interrupteur** (fig. 19). — Un interrupteur spécial K_1 a été construit pour faire passer le courant dans le pont pendant un intervalle de temps t_0 bien défini et réglable. Deux

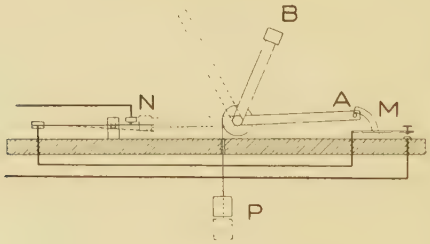

Fig. 19. — Interrupteur K_1.

tiges A et B sont fixées sur un axe portant une poulie sur laquelle s'enroule un câble supportant un poids P. Initialement la tige A est accrochée en M. En appuyant sur la manette M, on libère cette tige et on établit en même temps le courant. La partie mobile tourne alors sous l'influence du poids P, et la tige B vient frapper en N une lame de ressort qui coupe le courant. La coupure est ainsi extrêmement rapide, et même avec un courant de 50 ampères, elle ne

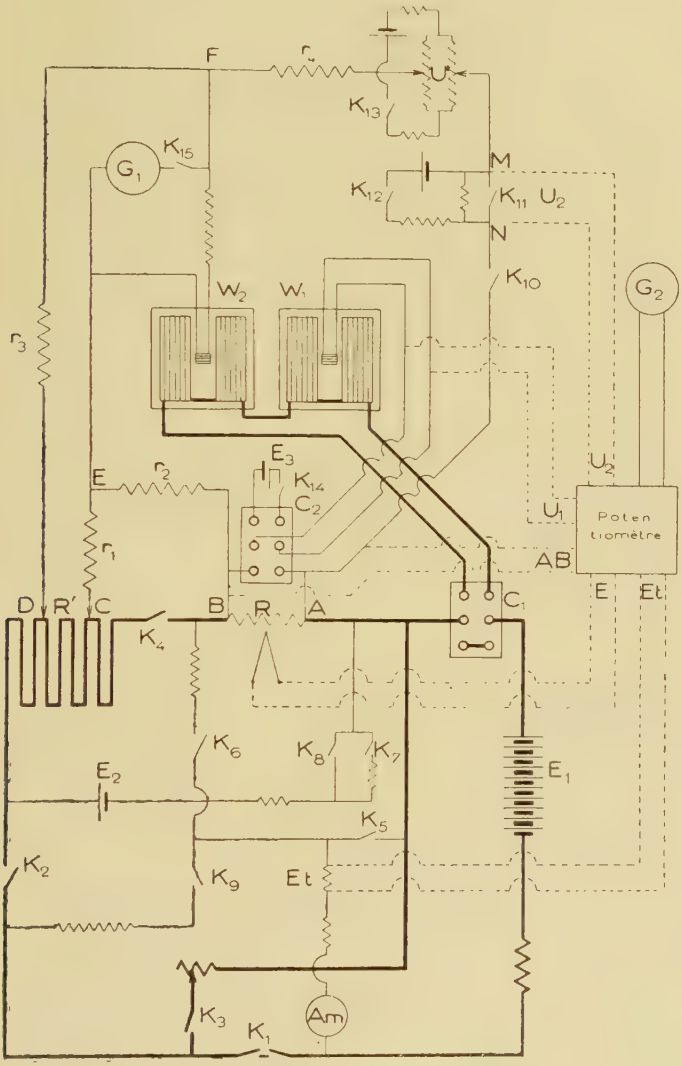

Fig. 20. — Schéma d'ensemble.

dure que 0,0023 seconde. On agit sur le temps t_0 de passage du courant en modifiant l'angle AB.

36. Résistance CD. — La résistance R′ à laquelle on compare la résistance R de l'échantillon et qui sert à effectuer le réglage principal du pont, est constituée par un fil de maillechort à section rectangulaire de 8 mm², long de 1 m. 50 environ. A l'une de ses extrémités est soudé un fil de cuivre de même section. Deux pinces spéciales à couteaux, avec manches en ébonite (afin de pouvoir les déplacer sans les échauffer avec les doigts, c'est-à-dire sans créer de force électromotrice variable) se trouvent chacune sur l'un de ces fils et servent de prises de tension. La partie utile de R′ est donc celle qui est comprise entre ces pinces. Le réglage approximatif se fait en déplaçant la pince qui est sur le fil de maillechort, et le réglage fin, au dix-millième près, en déplaçant celle qui est sur le fil de cuivre. Etant donnée la forte section utilisée, la valeur de R′ varie d'environ un demi dix-millième au cours de l'expérience, ce qui est négligeable.

37. Circuits d'intensité. — Le circuit principal (fig. 20) contient normalement les bobines « ampères » des deux wattmètres, mais un commutateur C_1 permet de les mettre hors circuit. Une batterie de 36 volts (E_1) donne le courant fort qui sert à la mesure. Un accumulateur auxiliaire E_2 permet, grâce au galvanomètre très sensible G_1, de régler le pont à l'aide d'une intensité insuffisante pour chauffer l'échantillon d'une manière appréciable (interrupteurs K_7 et K_8).

Une dérivation (interrupteur K_3) permet de faire passer le courant fort dans les bobines « ampères » des wattmètres, sans qu'il passe dans les circuits « volts », c'est-à-dire dans le pont. On peut régler la résistance de cette dérivation et l'égaler approximativement à celle du pont. Le contrôle se fait en envoyant

successivement dans le pont et dans la dérivation de K_3 un courant faible (K_9). La résistance de l'échantillon se mesure en l'isolant du pont (K_4 et K_{10} ouverts) et en y envoyant un courant faible (K_6). Enfin K_5 permet de faire passer un courant faible i' dans les bobines « ampères » seules des wattmètres (étalonnages en wattmètres ordinaires).

Ces trois derniers courants faibles passent dans un ampèremètre A*m* et dans une résistance étalon E*t* destinés respectivement à la mesure approchée et précise de ces courants.

38. Circuits de tension. — Les résistances r, r_1, r_2, r_3, r_4 du pont sont sans self. Sur la branche AF nous avons disposé :

1° Un interrupteur K_{10} pour pouvoir isoler la résistance échantillon ;

2° Un dispositif permettant d'introduire entre deux points M et N primitivement au même potentiel (interrupteur K_{11}), une tension U_2 servant à étalonner le pont en même temps que le wattmètre W_2;

3° Une force électromotrice réglable U′ destinée à compenser dans la diagonale les forces électromotrices parasites du pont.

La diagonale EF porte en permanence le circuit « volts » de W_2 et, accessoirement en dérivation (K_{15}), le galvanomètre sensible G_1 de faible résistance, servant au réglage du pont. Le cadre « volts » de W_1 est normalement en relation avec les bornes de l'échantillon, mais un coupleur C_2 permet de le mettre aux bornes d'une tension E_3 pour l'étalonnage en wattmètre ordinaire.

Enfin un potentiomètre à diverses sensibilités peut mesurer :

la tension aux bornes de la résistance étalon E*t*,

la tension aux bornes de l'échantillon,

la f. é. m. E du couple Pt, Pt-Rh,

la tension U_1 aux bornes du circuit « volts » de W_1,

la tension auxiliaire U_2 servant à l'étalonnage simultané du pont et du wattmètre W_2.

39. Corrections diverses et calcul plus complet de la méthode. — La puissance que perd le fil par rayonnement, conductibilité et convection est, en première approximation, proportionnelle à la différence de température échantillon-enceinte, soit $\Gamma\theta$.

Cette constante Γ doit être mesurée à chaque température en faisant circuler dans le fil un courant constant l'échauf-

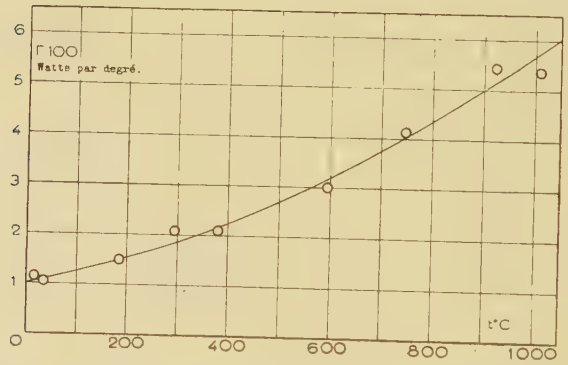

Fig. 21. — Variation thermique de la puissance Γ perdue par le fil pour un degré d'écart avec l'enceinte.

fant à une température stationnaire supérieure de 40° environ ([12]) à la température de l'enceinte. Si on mesure la tension et l'intensité, on peut en déduire :

1° La puissance dissipée dans le fil ;

2° Sa résistance et par conséquent sa température ;

3° La valeur de Γ, la température de l'enceinte étant donnée comme toujours par la force électromotrice du couple de platine qui y est fixé.

([12]) Soit la moitié de l'élévation totale θ_0 de température utilisée pour l'expérience.

La courbe de la figure 21 donne dans un cas particulier la variation de Γ en fonction de Θ.

La masse calorifique du fil varie avec sa température et l'on peut l'égaler en première approximation à :

$$\mu(1 + \nu\theta).$$

La capacité calorifique moyenne sera alors :

$$M = \mu\left(1 + \nu\frac{\theta_0}{2}\right),$$

θ_0 étant l'élévation totale de température.

Dans ces conditions l'énergie communiquée au fil pendant le temps dt s'écrit :

$$RI^2dt = \mu(1 + \nu\theta)Jd\theta + \Gamma\theta dt. \tag{14}$$

L'indication du wattmètre W_1 est, en tenant compte de ce que $I = Di$ (équ. 10, § 28) :

$$W_1 = \int_0^{t_0} RiIdt = D\int_0^{t_0} Ri^2dt,$$

celle du wattmètre W_2 :

$$W_2 = K\int_0^{t_0} i^2\Delta R dt.$$

Nous pouvons mettre la résistance de l'échantillon sous la forme :

$$R = a + b(\Theta + \theta) + c(\Theta + \theta)^2, \tag{15}$$

ou :

$$R - R_0 = \Delta R = (b + 2c\Theta)\theta + c\theta^2. \tag{16}$$

Le calcul élémentaire que l'on peut faire comme au § 27, mais à partir de ces données plus complètes, mène à l'équation (17), que l'on substituera à l'équation (6) (§ 27) et qui contient l'ensemble des corrections suivantes :

1° Courbure $\left(\text{développement de } \frac{\Delta R}{R}\right)$;

2° Pertes de chaleur $\left(\text{termes en } \frac{\Gamma}{R_0 I^2}\right)$;

3° Variation thermique de la chaleur spécifique (termes en ν) ;

4° Conductibilité électrique du pont (facteur D).

$$(17) \qquad JM = \frac{p}{2} K \frac{W_1^2}{W_2} - AW_1 + B \frac{W_2}{K},$$

avec :

$$p = \frac{b + 2c\theta}{R_0},$$

$$A = \frac{D}{3}\left[\frac{\Gamma}{R_0 I^2} + 2p - \frac{2c}{R_0 p} - \frac{\nu}{2}\right],$$

$$B = \frac{D^2}{18p}\left[2p^2 + 2\nu p - 2\frac{\nu c}{R_0 p} - 4\frac{c}{R_0} - \frac{16c^2}{p^2 R_0^2} - 4\nu^2 + \frac{\Gamma}{R_0 I^2}\left(8p - 5\nu - \frac{2c}{pR_0}\right) - \frac{\Gamma^2}{R_0^2 I^4}\right].$$

On constate que le coefficient D n'intervient que dans les termes correctifs et qu'il est inutile par conséquent de connaître avec précision les résistances du pont. Le deuxième terme est de l'ordre de 10 o/o et le troisième que nous n'avons indiqué ici qu'à titre documentaire, est inférieur à 1 o/o.

Pour la correction des pertes de chaleur, qui d'ailleurs n'excède pas 2 o/o vers 1 000° C., nous avons admis — après vérification à l'oscillographe — que l'intensité restait constante pendant l'expérience.

Marche d'une expérience

40. Mesures. — Lorsque le four est bien équilibré thermiquement et que l'on a mesuré sa température, c'est-à-dire la température initiale de l'échantillon, on procède aux réglages du pont.

On commence par régler la tension auxiliaire U' de manière à compenser les forces électromotrices parasites : en fermant K_{15} le spot du galvanomètre G_1 ne doit pas bouger. On ouvre alors K_4 et on règle r_3 en fermant K_7 puis K_8 de manière que le galvanomètre ne bouge pas si on abaisse K_{15} (réglage complémentaire). On ferme K_4 et on règle R' (clefs K_{15} et K_7 puis K_8) (réglage principal).

K_3 et K_4 étant ouverts, on ferme K_2 et K_3. Il circule dans le pont un courant faible que nous pouvons mesurer au potentiomètre grâce à la résistance étalon $E\ell$. Si on ouvre K_2 pour fermer K_3, le courant traversant la résistance étalon doit être le même. S'il ne l'est pas, on agit sur la résistance de la branche auxiliaire mise en circuit par K_3. Cette branche doit avoir la même résistance que l'ensemble du pont.

Il faut ensuite revenir à la compensation des f. é. m. parasites, puisqu'on a modifié les résistances du pont ; puis au réglage complémentaire et enfin au réglage principal. Lorsqu'on est parvenu à réaliser simultanément ces trois réglages, on lit rapidement les positions des spots de W_1 et de W_2, et on manœuvre l'interrupteur K_1 (K_1 fermé, K_{15} ouvert). Si les résistances additionnelles des cadres des volts et la résistance en série avec le générateur E_1 ont été convenablement choisies, les spots dévient d'environ 400 mm., et on peut lire facilement leurs élongations maxima, car ils sont sur la même échelle, et les wattmètres ont été prévus de périodes différentes (7 et 22 secondes) de manière que l'observateur ait le temps matériel de faire successivement les deux lectures.

Les spots étant revenus à leurs positions d'équilibre, on manœuvre C_1 et l'on recommence l'expérience sans faire passer le courant dans les circuits « ampères » des wattmètres. On note les déviations qui en résultent. On ramène C_1 à sa position normale. On ouvre K_2, on ferme K_3 et on envoie cette fois le courant dans les circuits « ampères » seuls. On effectue ces deux corrections (soustractives) (§ 31) et on obtient les déviations β_1 et β_2.

41. Etalonnages et dépouillement. — Chacun des deux balistiques s'étalonne en wattmètre ordinaire. On envoie (K_5) un courant i' constant dans les circuits « ampères » et on le mesure au potentiomètre par l'intermédiaire de la résistance étalon $E\ell$. On établit (C_2, K_{14}) et l'on mesure une tension U_1 aux bornes du circuit « volts » de W_1. On mesure ensuite la tension U_2 introduite par K_{11} dans la branche AF du pont. On note les déviations correspondantes des appareils, puis les déviations produites :

1° par i' seul (K_{11} fermé et K_{14} ouvert),

2° par U_1 et U_2 seuls (K_5 ouvert).

Ces corrections soustractives étant effectuées, on est en possession des déviations γ_1 et γ_2, et par suite des sensibilités Σ et σ des appareils.

A chaque température on a soin de mesurer, à l'aide d'un courant faible (K_4 et K_{10} ouverts, K_6 fermé), la résistance de l'échantillon. Au potentiomètre on mesure les tensions aux bornes de l'enceinte et de la résistance E*ℓ*. Pour tenir compte des f. é. m. parasites des circuits qui entrent en jeu, il faut ensuite mesurer les tensions qui existent entre les mêmes bornes lorsque le courant ne passe pas (K_6 ouvert).

Pour évaluer les pertes de chaleur (§ 39), on recommence cette mesure avec un courant fort et en procédant rapidement, pour que l'enceinte n'ait pas le temps de s'échauffer notablement.

Tous les éléments (sauf ν) sont alors à la disposition de l'expérimentateur pour calculer les coefficients de l'équation (17). Ce n'est que plus tard qu'on peut effectuer les corrections (de l'ordre de 3 o/oo) dues à la valeur de ν.

La masse du fil se mesure après démontage de l'appareil : les pinces à couteaux l'ont marqué nettement. Il est facile de le couper aux mêmes endroits et de le porter sur une balance.

RÉSULTATS OBTENUS

42. Platine. — Ce métal a été étudié (échantillon dit « physiquement pur »), non pour ajouter une détermination nouvelle à la série considérable qui existe déjà, mais pour éprouver la méthode. Les points obtenus ont été rassemblés au tableau XI.

TABLEAU XI

Chaleur spécifique du platine.

t° C	c_p	t° C	c_p
35	0,0311	981	0,0386
62	0,0313	783,3	0,0361
210,3	0,0326	542,8	0,0348
416	0,0337	330,4	0,0331
672,3	0,0349	153,9	0,0322
37,1	0,0317		

Si l'on admet pour représenter cette chaleur spécifique une fonction linéaire, elle a pour expression :

$$c_p = 0{,}0311 + 6{,}6.10^{-6}\, t.$$

La comparaison avec les déterminations précédentes doit être faite avec prudence. Nous constatons par exemple que Jones, Langmuir et Mackay (31) donnent l'équation :

$$C_p = 5{,}40 + 1{,}7.10^{-3}\, T$$

pour la chaleur atomique du platine, en se basant sur les

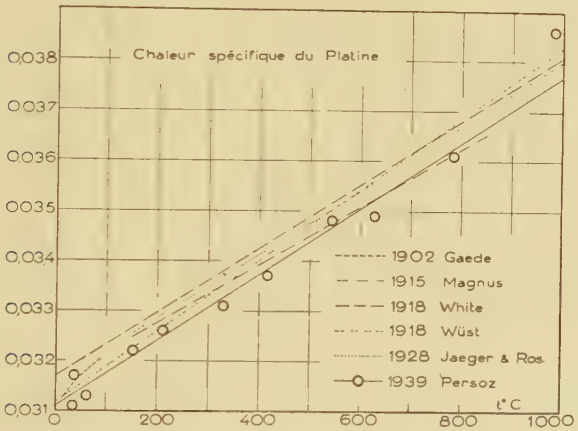

Fig. 22. — Chaleur spécifique du platine.

mesures de Walter et White (32) et de Wüst (33). Or cette équation s'écrit aussi :

$$c_p = 0{,}03004 + 8{,}7.10^{-6}\, t,$$

tandis que l'équation indiquée par Walter et White est :

$$c_p = 0{,}03169 + 6{,}4.10^{-6}\, t,$$

et que celle qui est extraite des mesures de Wüst est de la forme :

$$c_p = 0{,}0312 + 7{,}1.10^{-6}\, t.$$

Signalons aussi que les *Tables de Landolt*, supplément II, p. 1168 (Platine), donnent pour les mesures de Jaeger et Rosenbohm (34) des valeurs de c_p tout à fait différentes de celles qu'ils ont trouvées réellement. Les valeurs indiquées pour C_p sont bien les leurs. Elles correspondent à l'équation :

$$c_p = 0{,}03162 + 6{,}1725.10^{-6}\ t + 2{,}3325.10^{-10}\ t^2.$$

Gaede (7) donne entre 17° et 100° C. l'expression :

$$c_p = 0{,}031054 + 13{,}6.10^{-6}\ t - 0{,}028.10^{-6}\ t^2.$$

Magnus (35) donne l'équation :

$$c_p = 0{,}03159 + 5{,}8468.10^{-6}\ t,$$

et ses mesures paraissent sérieuses. Nous pensons qu'il est inutile de mentionner les déterminations plus anciennes.

Le graphique de la figure 22 permet de faire la comparaison annoncée.

43. Nickel. 1° Au-dessous du point de Curie. — Nous avons primitivement essayé cette méthode sur le nickel à température ordinaire et avons trouvé des résultats erronés de plus de 50 o/o à cause du fait suivant. L'aimantation transversale qui prenait naissance dans le fil à cause du passage du courant (30 à 50 ampères) amenait une diminution de sa résistance de quelques centièmes (phénomène signalé par Gerlach (36)). Or l'augmentation de résistance due à l'échauffement est de cet ordre de grandeur, de sorte que l'erreur qui résultait de cette aimantation pouvait fort bien atteindre 50 à 100 o/o.

L'échantillon a été placé dans un champ magnétique longitudinal de 600 gauss de manière que son aimantation soit fixée, mais les mesures ont encore présenté des écarts de l'ordre de 5 o/o, la direction de l'aimantation n'étant pas suffisamment invariable lors du passage du courant. Nous avons préféré nous borner, pour l'instant, aux métaux non ferromagnétiques.

44. 2° **Au-dessus du point de Curie** (41). — Le nickel n'a donc été étudié qu'entre 500° et 1 000° C. Cette limite supérieure de 1 000° nous a été imposée par le four utilisé, mais non par la méthode elle-même. Le fil employé avait un diamètre de 0 mm. 5 et répondait à l'analyse suivante :

Ni	99,51 o/o
Cu	0,06 »
Fe	0,19 »
Mg	0,18 »
Si	0,02 »
C	0,04 »

Les résultats sont rassemblés au tableau XII.

TABLEAU XII

Chaleur spécifique du nickel.

N° d'ordre	t° C	c_p
1	1 006,4	0,1484
2	959,4	0,1471
3	902,2	0,1446
4	842,9	0,1438
5	771,3	0,1406
6	709,0	0,1398

N° d'ordre	t° C	c_p
7	617,9	0,1378
8	540,2	0,1350
9	424,4	0,1359
10	527,5	0,1339
11	703,3	0,1393
12	918,7	0,1462

Ces points se placent à peu près sur la droite :

$$c_p = 0{,}119 + 29{,}2.10^{-6}\, t.$$

Le point n° 9 est aberrant car il est manifestement trop voisin du point de Curie (temp. initiale : 380° ; point de Curie : 358°). Dans cette région le développement en série utilisé pour la résistance R et pour $\frac{\Delta R}{R}$ n'est plus valable car la résistance varie trop brusquement avec la température.

Sur le graphique de la figure 23 nous avons comparé les différentes données expérimentales sur la chaleur spécifique vraie au-dessus du point de Curie. D'une part Pionchon (37), Umino (38) et Ewert (39) par la méthode calorimétrique habituelle ont trouvé des valeurs nettement différentes de celles du tableau XII. D'autre part Klinkhardt (8) par la

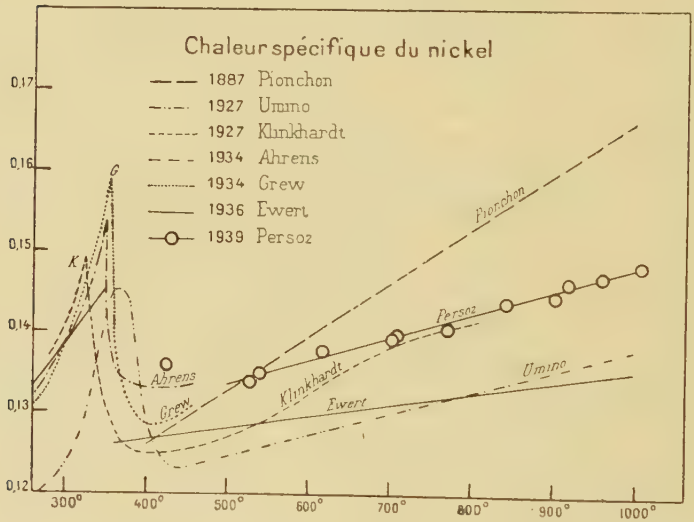

Fig. 23. — Chaleur spécifique du nickel.

méthode que nous avons signalée (§ 6) a trouvé vers 700° et 800° des points en accord avec ceux que nous proposons, mais vers 500° des valeurs différentes. Les mesures de Pionchon paraissent cependant assez sérieuses, car ce sont des mesures comparatives entre un bloc de nickel et un bloc de platine placé exactement dans les mêmes conditions que le premier. Malheureusement cet auteur a adopté pour ce métal de référence l'équation de Violle,

$$c_p = 31{,}7.10^{-3} + 12.10^{-6}\, t,$$

qui, à haute température, donne des valeurs beaucoup trop

fortes. Ceci explique pourquoi les résultats de Pionchon relatifs au nickel sont supérieurs à tous les autres. On ne doit pas accorder de crédit aux mesures d'Umino qui donnent vers 300° C., où la chaleur spécifique est bien connue, des écarts de 12 à 16 o/o avec la valeur exacte. D'ailleurs cet auteur évalue au millième de degré près des variations de température de l'ordre de 1 000°. Cette précision du millionième semble curieuse! Les mesures d'Ewert paraissent plus sérieuses. On doit cependant signaler que cet auteur a trouvé dans la chaleur spécifique deux discontinuités (350° et 360° C.) au lieu d'une (358° C.)!

Nous avons également porté sur le graphique (fig. 23) les résultats d'Ahrens (11) et de Grew (40) qui semblent se raccorder convenablement avec ceux du tableau XII. Il est seulement regrettable qu'ils ne dépassent pas 450° C. Les procédés employés ont été rappelés § 25 (méthodes Ahrens et Lapp).

45. **Résultats corrigés sur le nickel.** — Vu le peu de données qui existent sur les propriétés mécaniques du nickel à haute température, nous avons provisoirement extrapolé les corrections de dilatation calculées par Mme Lapp (10). Cette opération nous a donné :

à 500°, $C_p - C_v = 0{,}42$ (atomique),
à 1 000°, $C_p - C_v = 0{,}80$.

La correction de dégénérescence quantique à ces mêmes températures a pour valeur 0,07 et 0,03. D'où les valeurs de C_v corrigée :

7,49 à 500° C.,
7,92 à 1 000° C.

Ces valeurs sont évidemment incertaines à cause du peu de précision sur $C_p - C_v$ et doivent être considérées comme provisoires.

CONCLUSION

46. Un bref historique (§ 6 et 25) rappelle les principes de quelques anciennes méthodes de mesure des chaleurs spécifiques vraies parmi les plus intéressantes. Deux nouveaux procédés dont les principes sont dus à M. Néel sont décrits en détail, étudiés et employés. Deux appareils ont été calculés et construits : le joulemètre et le wattmètre balistique. On donne les résultats des déterminations qui ont été faites sur la chaleur spécifique du cuivre, du platine, du nickel et de deux alliages de nickel et de cuivre, mais on laisse de côté toute interprétation théorique.

J'exprime ma reconnaissance à M. Pierre Weiss qui m'a accueilli à l'Institut de Physique de Strasbourg, et à la Caisse Nationale de la Recherche Scientifique, grâce à laquelle j'ai pu effectuer ces travaux expérimentaux; et je suis très heureux de remercier ici M. Néel pour les nombreuses idées qu'il m'a suggérées au cours de ces recherches.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Néel. — *C. R.*, **207** (1938), 1384.
(2) Néel et Persoz. — *C. R.*, **208** (1939), 642.
(3) Persoz. — *C. R.*, **208** (1939), 1632.
(4) Moser. — *Phys. Z.*, **37** (1936), 737.
(5) Nernst. — *Ann. der Phys.*, **36** (1911), 395.
(6) Sykes et Jones. — *Monthly Journ. of the Inst. of Metals* [3], **9** (1936), 469.
(7) Gaede. — *Phys. Z.*, **4** (1902), 105.
(8) Klinkhardt. — *Ann. der Phys.*, **84** (1927), 167.
(9) Thomas et Davies. — *Phil. Mag.*, **24** (1937), 600.
(10) Lapp. — *Ann. de Phys.*, **12** (1929), 442.
(11) Ahrens. — *Ann. der Phys.*, **21** (1934), 169.
(12) Lecher. — *Verh. d. D. Phys. Ges.*, **9** (1907), 647.
(13) Harper. — *Bull. Bur. of Stand.*, **11** (1915), 259.
(14) Behrens et Drucker. — *Z. f. phys. Chem.*, **113** (1924), 79.

(15) Corbino. — *Phys. Z.*, **13** (1912), 375.
(16) Corbino. — *Phys. Z.*, **14** (1913), 915.
(17) Pirani. — *Verh. d. D. Phys. Ges.*, **14** (1912), 1037.
(18) Sucksmith et Potter. — *Proc. Roy Soc.*, **112** (1926), 157.
(19) Néel et Persoz. — *Bull. Soc. Fr. de Phys.*, **409** (1937), 121
(20) Néel. — *Bull. Soc. Fr. de Phys.*, **334** (1933), 20.
(21) Krupkowski. — *Rev. Mét.*, **26** (1929), 193.
(22) Johansson. — *Ann. der Phys.*, **76** (1925), 454.
(23) Grüneisen. — *Ann. der Phys.*, **25** (1908), 825.
(24) Mitinsky. — *Chim. et Indust.*, **29** (1933), 616.
(25) Debye. — *Ann. der Phys.*, **39** (1912), 789.
(26) Corbino. — *Phys. Z.*, **11** (1910), 413.
(27) Corbino. — *Phys. Z.*, **12** (1911), 292.
(28) Hunkel. — *Phys. Z.*, **24** (1923), 252.
(29) Bockstahler. — *Phys. Rev.*, **24** (1925), 677.
(30) Persoz. — *Bull. Soc. Fr. de Phys.*, **429** (1939), 39.
(31) Jones, Langmuir et Mackay. — *Phys. Rev.*, **30** (1927), 201.
(32) Walter et White. — *Phys. Rev.*, **12** (1918), 436.
(33) Wüst. — *Forschungsarb. a. d. Geb. d. I. W.*, **204** (1918).
(34) Jaeger et Rosenbohm. — *Rec. Trav. Chim.*, Pays-Bas, **47** (1928), 513 ou *Proc. Amst.*, **30** (1927), 905 et 1069.
(35) Magnus. — *Ann. der Phys.*, **48** (1915), 983.
(36) Gerlach. — *Leipziger Vorträge* (1933). Magnetismus, 10.
(37) Pionchon. — *Ann. de Chim. et de Phys.*, **11** (1887), 33.
(38) Umino. — *Sc. Rep. of Tôhoku*, **16** (1927), 593.
(39) Ewert. — *Kon. Ak. Wet. Amsterdam*, **39** (1936), 833.
(40) Grew. — *Proc. of the Roy. Soc.*, **145** (1934), 509.
(41) Persoz. — *Bull. Soc. Fr. de Phys.*, **436** (1939), 115.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

Pages

1. Contenu du mémoire 1

BRÈVE DISCUSSION SUR LES DEUX SORTES DE MÉTHODES EXISTANTES

2. Pureté de l'échantillon 2
3. Procédé de chauffage de l'échantillon. . . 2
4. Mesure de l'élévation de température . . . 2
5. Pertes de chaleur 3

PREMIÈRE PARTIE

6. Rappel des méthodes A les plus connues. . 5

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE. 7

7. Principe. 7

Dispositif expérimental. 9

8. Echantillon. 9
9. Enceinte. 10
10. Thermostat 10
11. Four 11

Etude particulière du joulemètre 13

12. Utilité 13
13. Principe. 14
14. Réalisation 15
15. Erreurs et corrections. 17
16. Conclusion 19
17. Caractéristiques 19

Marche d'une mesure 20

18. Etalonnages. 20
19. Mesure 22
20. Dépouillement 23

Pages

Résultats obtenus 25

21. Cuivre 25
22. Alliages nickel-cuivre 26
23. Corrections de dilatation et de dégénérescence quantique. 28
24. Résultats 31

Deuxième partie

25. Rappel des méthodes B les plus connues. . 33

Description de la méthode 73

26. Notations 37
27. Principe 39
28. Etude particulière du pont de Thomson . . 40

Etude particulière des wattmètres balistiques . . . 44

29. Définition 44
30. Réalisation 44
31. Mouvements du cadre et corrections . . . 45
32. Caractéristiques 48

Dispositif expérimental 49

33. Echantillon et enceinte 49
34. Four 51
35. Interrupteur 52
36. Résistance CD 54
37. Circuits d'intensité 54
38. Circuits de tension 55
39. Corrections diverses et calcul plus complet de la méthode 56
40. Mesures 58
41. Etalonnages et dépouillement 59

Résultats obtenus 60

42. Platine 60
43. Nickel au-dessous du point de Curie . . . 62
44. Nickel au-dessus du point de Curie . . . 63
45. Résultats corrigés. 65
46. Conclusion 66
47. Bibliographie 66
48. Table des matières. 69

VU ET APPROUVÉ :

Strasbourg, le 10 Août 1939.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

A. DANJON.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Strasbourg, le 25 Août 1939.

Le Recteur de l'Académie de Strasbourg,
Président du Conseil de l'Université,

A. TERRACHER.

IMPRIMÉ PAR BARNÉOUD FRÈRES ET C^ie^ A LAVAL (FRANCE)